

LA FÍSICA DEL FUTURO

CÓMO LA CIENCIA DETERMINARÁ EL DESTINO DE LA HUMANIDAD Y NUESTRA VIDA COTIDIANA EN EL SIGLO XXII

El futuro ya se está inventando en los laboratorios de los científicos más punteros de todo el mundo. Con toda probabilidad, en 2100 controlaremos los ordenadores a través de diminutos sensores cerebrales y podremos mover objetos con el poder de nuestras mentes, la inteligencia artificial estará en todas partes y lentillas con conexión a internet pondrán toda la información a nuestro alcance en un simple parpadeo.

La medicina molecular permitirá cultivar casi cualquier órgano y curar enfermedades genéticas. Millones de diminutos sensores de ADN y nanopartículas patrullarán nuestras células sanguíneas para detectar cualquier atisbo de enfermedad. Los rápidos avances en investigación genética nos permitirán ralentizar o incluso revertir el proceso de envejecimiento alargando la vida humana de forma espectacular.

Pero estas extraordinarias revelaciones son solo la punta del iceberg. Kaku estudia robots sensibles, cohetes de antimateria, visión de rayos X, y la posibilidad de crear nuevas formas de vida. También contempla el desarrollo de la economía mundial y formula las dos preguntas clave: ¿quiénes serán los ganadores y quiénes los perdedores del futuro?, ¿quiénes tendrán empleo y qué países prosperarán?

Sin perder de vista los rigurosos principios científicos y examinando la velocidad a la que madurarán ciertas tecnologías y hasta dónde podrán llegar, Michio Kaku nos ofrece en *La física del futuro* un recorrido asombroso a través de los próximos cien años de revolución científica.

Michio Kaku

La física del futuro

Cómo la ciencia determinará el destino de la humanidad y nuestra vida cotidiana en el siglo XXII

ePub r1.0
Titivillus 23.09.2018

Título original: *Physics of the Future*
Michio Kaku, 2011
Traducción: Mercedes García Garmilla
Diseño de portada: Michael J. Windsor

Editor digital: Titivillus
ePub base r2.0

LA FÍSICA DEL FUTURO

Cómo la ciencia determinará
el destino de la humanidad
y nuestra vida cotidiana
en el siglo XXII

MICHIO KAKU

Traducción de
Mercedes García Garmilla



Índice de contenido

Cubierta

La física del futuro

Agradecimientos

Introducción Una predicción para los próximos 100 años

1. El futuro de los ordenadores: La mente controlará la materia

2. El futuro de la IA: El auge de las máquinas

3. El futuro de la medicina: Más allá de la perfección

4. Nanotecnología: ¿Todo a partir de nada?

5. El futuro de la energía: La energía de las estrellas

6. El futuro de los viajes espaciales: Hacia las estrellas

7. El futuro de la riqueza: Ganadores y perdedores

8. El futuro de la humanidad: Una civilización planetaria

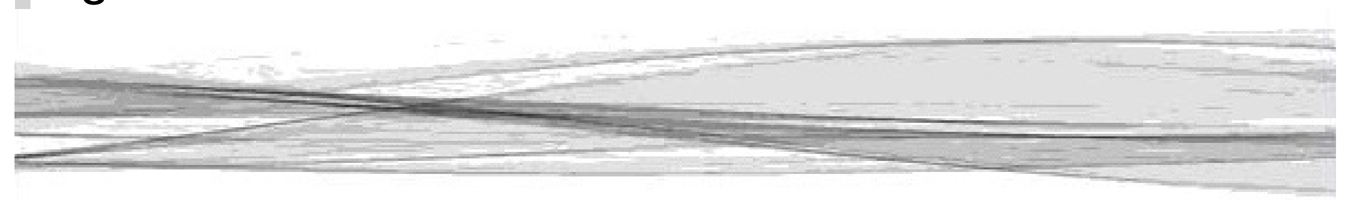
9. Un día cualquiera en 2100

Bibliografía

Sobre el autor

A Shizue, mi querida esposa,
y a mis hijas Michelle y Alyson

Agradecimientos



DESEO expresar mi agradecimiento a todos aquellos que han trabajado infatigablemente para conseguir que este libro sea un éxito. En primer lugar, quiero dar las gracias a mis editores: a Roger Scholl, que fue un guía para muchos de mis libros anteriores y me propuso el desafío de escribir un libro tan osado como este, y también a Edward Kastenmeier, que ha tenido la paciencia de realizar incontables sugerencias y revisiones, contribuyendo así en gran medida a reforzar y enriquecer la presentación de esta obra. Además, me gustaría dar las gracias a Stuart Krichevsky, que ha sido mi agente durante muchos años y siempre me ha animado a abordar empresas cada vez más innovadoras y emocionantes.

Por supuesto, también deseo manifestar mi agradecimiento a los más de trescientos científicos con los que he mantenido entrevistas y debates sobre temas relativos a la ciencia. Quisiera pedirles disculpas por haber irrumpido en sus laboratorios con un equipo de filmación de la BBC o de los canales Discovery y Science, plantando ante sus narices un micrófono y una cámara de televisión. No se me oculta que esto pudo perturbar su trabajo de investigación, pero espero que el producto final pueda justificar tanto trastorno.

Quiero dar las gracias a algunos de estos pioneros e innovadores:

Eric Chivian, premio Nobel, Centro para la Salud y el Medio Ambiente Global, Facultad de Medicina de Harvard.

Peter Doherty, premio Nobel, St. Jude Children's Research Hospital.

Gerald Edelman, premio Nobel, Instituto de Investigaciones Scripps.

Murray GellMann, premio Nobel, Instituto de Santa Fe y Caltech.

Walter Gilbert, premio Nobel, Universidad de Harvard.

David Gross, premio Nobel, Instituto Kavli para Física Teórica.

Henry Kendall (†), premio Nobel, MIT.

Leon Lederman, premio Nobel, Instituto de Tecnología de Illinois.

Yoichiro Nambu, premio Nobel, Universidad de Chicago.

Henry Pollack, premio Nobel, Universidad de Michigan.

Joseph Rotblat, premio Nobel, St. Bartholomew's Hospital.

Steven Weinberg, premio Nobel, Universidad de Texas en Austin.

Frank Wilczek, premio Nobel, MIT.

Amir Aczel, autor de *Uranium Wars*.

Buzz Aldrin, astronauta de la NASA y el segundo hombre que pisó la Luna.

Geoff Andersen, investigador adjunto, Academia de la Fuerza Aérea de Estados Unidos, autor de *The Telescope*.

Jay Barbree, corresponsal de la NBC y coautor de *Moon Shot.*

John Barrow, físico, Universidad de Cambridge, autor de *Imposibilidad: los límites de la ciencia y la ciencia de los límites*.

Marcia Bartusiak, autora de *La sinfonía inacabada de Einstein*.

Jim Bell, profesor de astronomía, Universidad de Cornell.

Jeffrey Bennet, autor de *Beyond UFOs*.

Bob Berman, astrónomo, autor de *Secrets of the Night Sky*.

Leslie Biesecker, director del Departamento de Investigación de Enfermedades Genéticas, Institutos Nacionales de la Salud.

Piers Bizony, divulgador científico, autor de *How to Build Your Own Spaceship*.

Michael Blaese, científico de los Institutos Nacionales de la Salud.

Alex Boese, fundador del Museo de Hoaxes.

Nick Bostrom, transhumanista, Universidad de Oxford.

Robert Bowman, teniente coronel, Instituto de Estudios Espaciales y de Seguridad.

Lawrence Brody, director de la División de Tecnología del Genoma, Institutos Nacionales de la Salud.

Rodney Brooks, antiguo director del Laboratorio de Inteligencia Artificial (AI Lab) del MIT.

Lester Brown, fundador del Earth Policy Institute.

Michael Brown, profesor de astronomía, Caltech.

James Canton, fundador del Institute for Global Futures, autor de *The Extreme Future*.

Arthur Caplan, director, Centro de Bioética, Universidad de Pensilvania.

Fritjof Capra, autor de *La ciencia de Leonardo*.

Sean Carroll, cosmólogo, Caltech.

Andrew Chaikin, autor de *A Man on the Moon*.

Leroy Chiao, antiguo astronauta de la NASA.

George Church, director, Centro de Genética Computacional, Facultad de Medicina de Harvard.

Thomas Cochran, físico, Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales.

Christopher Cokinos, escritor científico, autor de *The Fallen Sky*.

Francis Collins, director de los Institutos Nacionales de la Salud.

Vicki Colvin, directora de nanotecnología biológica y medioambiental, Universidad Rice.

Neil Comins, autor de *The Hazards of Space Travel*.

Steve Cook, director de tecnologías espaciales, Dynetics, antiguo portavoz de la NASA.

Christine Cosgrove, autora de *Normal at Any Cost*.

Steve Cousins, presidente y director general, Willow Garage.

Brian Cox, físico, Universidad de Manchester, presentador científico de la BBC.

Phillip Coyle, antiguo subsecretario de Defensa, Departamento de Defensa de Estados Unidos.

Daniel Crevier, autor de *Inteligencia artificial*.

Ken Croswell, astrónomo, autor de *Magnificent Universe*.

Steven Cummer, informático, Universidad Duke.

Mark Cutkosky, ingeniería mecánica, Universidad de Stanford.

Paul Davies, físico, autor de *Superfuerza*.

Aubrey de Gray, director general científico, Fundación SENS.

Michael Dertouzos (†), antiguo director del Laboratorio de Ciencias de la Computación, MIT.

Jared Diamond, ganador del premio Pulitzer, profesor de geografía, UCLA.

Mariette DiChristina, redactora jefe del *Scientific American*.

Peter Dilworth, científico del Laboratorio de Inteligencia Artificial (AI Lab) del MIT.

John Donoghue, creador de BrainGate, Universidad Brown.

Ann Druyan, viuda de Carl Sagan, Cosmos Studios.

Freeman Dyson, profesor emérito de física, Instituto de Estudios Avanzados, Princeton.

Jonathan Ellis, físico, CERN.

Daniel Fairbanks, autor de *Relics of Eden*.

Timothy Ferris, profesor emérito de la Universidad de California, Berkeley, autor de *Coming of Age in the Milky Way*.

Maria Finitzo, cineasta, ganadora del Peabody Award, *Mapping Stem Cell Research*.

Robert Finkelstein, experto en inteligencia artificial.

Christopher Flavin, Instituto WorldWatch.

Louis Friedman, cofundador de la Planetary Society.

James Garvin, antiguo director científico de la NASA, Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA.

Evalyn Gates, autor de *Einstein's Telescope*.

Jack Geiger, cofundador de Physicians for Social Responsibility.

David Gelernter, profesor de informática, Universidad de Yale.

Neil Gershenfeld, director del Centro de Bits y Átomos, MIT.

Paul Gilster, autor de *Centauri Dreams*.

Rebecca Goldburg, científica que trabajó en el Fondo para la Defensa del Medio Ambiente, directora de Marine Science, Pew Charitable Trust.

Don Goldsmith, astrónomo, autor de *The Runaway Universe*.

Seth Goldstein, profesor de informática, Universidad Carnegie Mellon.

David Goodstein, antiguo subdirector del Caltech, profesor de física.

J. Richard Gott III, profesor de astrofísica, Universidad de Princeton, autor de *Los viajes en el tiempo y el universo de Einstein*.

Stephen Jay Gould (†), biólogo, Harvard Lightbridge Corp.

Thomas Graham, embajador, experto en satélites espía.

John Grant, autor de *Corrupted Science*.

Eric Green, director del Instituto Nacional de Investigación del Genoma Humano, Institutos Nacionales de la Salud.

Ronald Green, autor de *Babies by Design*.

Brian Greene, profesor de matemáticas y física, Universidad de Columbia, autor de *El universo elegante*.

Alan Guth, profesor de física, MIT, autor de *El universo inflacionario*.

William Hanson, autor de *The Edge of Medicine*.

Leonard Hayflick, profesor de anatomía, Facultad de Medicina de San Francisco, Universidad de California.

Donald Hillebrand, director del Centro de Investigación del Transporte, Laboratorio Nacional Argonne.

Frank von Hipple, físico, Universidad de Princeton.

Jeffrey Hoffman, antiguo astronauta de la NASA, profesor de aeronáutica y astronáutica, MIT.

Douglas Hofstadter, ganador del premio Pulitzer, autor de *Gödel, Escher, Bach: un eterno y grácil bucle*.

John Horgan, Instituto de Tecnología Stevens, autor de *El fin de la ciencia*.

Jamie Hyneman, presentador del programa *MythBusters*, emitido por Discovery Channel.

Chris Impey, profesor de astronomía, Universidad de Arizona, autor de *Una historia del cosmos*.

Robert Irie, científico que trabajó en el Laboratorio de Inteligencia Artificial (AI Lab) del MIT, Hospital General de Massachusetts.

P. J. Jacobowitz, revista *PC*.

Jay Jaroslav, científico del Laboratorio de Inteligencia Artificial (AI Lab) del MIT.

Donald Johanson, paleoantropólogo, descubridor de Lucy.

George Johnson, periodista científico, *New York Times*.

Tom Jones, antiguo astronauta de la NASA.

Steve Kates, astrónomo y presentador radiofónico.

Jack Kessler, profesor de neurología, director del Instituto de Neurociencias Feinberg, Universidad del Noroeste.

Robert Kirshner, astrónomo, Universidad de Harvard.

Kris Koenig, cineasta y astrónomo.

Lawrence Krauss, Universidad del Estado de Arizona, autor de *The Physics of Star Trek*.

Robert Lawrence Kuhn, cineasta y filósofo, serie televisiva de la PBS *Closer to Truth*.

Ray Kurzweil, inventor, autor de *La era de las máquinas espirituales*.

Robert Lanza, biotecnología, Advanced Cell Technology.

Roger Launius, coautor de *Robots in Space*.

Stan Lee, creador de Marvel Comics y SpiderMan.

Michael Lemonick, antiguo redactor científico, revista *Time*, Climate Central.

Arthur LernerLam, geólogo, vulcanista, Universidad de Columbia.

Simon LeVay, autor de *When Science Goes Wrong*.

John Lewis, astrónomo, Universidad de Arizona.

Alan Lightman, MIT, autor de *Sueños de Einstein*.

George Linehan, autor de *SpaceShipOne*.

Seth Lloyd, MIT, autor de *Programming the Universe*.

Joseph Lykken, físico, Laboratorio Nacional Fermi (Fermilab).

Pattie Maes, MIT Media Lab.

Robert Mann, autor de *Forensic Detective*.

Michael Paul Mason, autor de *Head Cases*.

W. Patrick McCray, autor de *Keep Watching the Skies!*

Glenn McGee, autor de *El bebé perfecto*.

James McLurkin, científico que trabajó en el Laboratorio de Inteligencia Artificial (AI Lab) del MIT, Universidad Rice.

Paul McMillan, director, Spacewatch, Universidad de Arizona.

Fulvio Melia, profesor de física y astronomía, Universidad de Arizona.

William Meller, autor de *Evolution Rx*.

Paul Meltzer, Institutos Nacionales de la Salud.

Marvin Minsky, MIT, autor de *The Society of Mind*.

Hans Moravec, profesor de investigación, Universidad Carnegie Mellon, autor de *El hombre mecánico*.

Phillip Morrison (†), físico, MIT.

Richard Muller, astrofísico, Universidad de California en Berkeley.

David Nahamoo, especialista en tecnología del lenguaje humano con IBM.

Christina Neal, vulcanista, Observatorio Vulcanológico de Alaska, Servicio Geológico de Estados Unidos.

Michael Novacek, conservador del Museo Americano de Historia Natural, mamíferos fósiles.

Michael Oppenheimer, experto en medio ambiente, Universidad de Princeton.

Dean Ornish, profesor clínico de medicina, Universidad de California, San Francisco.

Peter Palese, profesor de microbiología, Facultad de Medicina de Mt. Sinai.

Charles Pellerin, antiguo funcionario de la NASA.

Sidney Perkowitz, profesor de física, Universidad Emory, autor de *Hollywood Science*.

John Pike, director, GlobalSecurity.org.

Jena Pincott, autora de *Do Gentlemen Really Prefer Blondes?*

Tomaso Poggio, inteligencia artificial, MIT.

Correy Powell, redactor jefe de la revista *Discover*.

John Powell, fundador de JP Aerospace.

Richard Preston, autor de *Zona caliente* y *The Demon in the Freezer*.

Raman Prinja, profesor de astrofísica, University College de Londres.

David Quammen, escritor de divulgación científica, autor de *El remiso Mr. Darwin.*

Katherine Ramsland, científica forense.

Lisa Randall, profesora de física teórica, Universidad de Harvard, autora de *Warped Passages*.

Sir Martin Rees, profesor de cosmología y astrofísica, Universidad de Cambridge, autor de *Antes del principio: el cosmos y otros universos*.

Jeremy Rifkin, fundador de la Foundation on Economic Trends.

David Riquier, director de Corporate Outreach, MIT Media Lab.

Jane Rissler, Union of Concerned Scientists.

Steven Rosenberg, Instituto Nacional del Cáncer, Institutos Nacionales de la Salud.

Paul Saffo, futurólogo, trabajó en el Instituto para el Futuro, profesor consultor en la Universidad de Stanford.

Carl Sagan (†), Universidad de Cornell, autor de *Cosmos*.

Nick Sagan, coautor de *¿Y esto es el futuro?*

Michael Salamon, programa «Beyond Einstein» de la NASA.

Adam Savage, presentador del programa *MythBusters*.

Peter Schwartz, futurólogo, cofundador de Global Business Network, autor de *The Long View*.

Michael Shermer, fundador de la Skeptics Society y de la revista *Skeptic*.

Donna Shirley, antigua directora del Programa de Exploración de Marte de la NASA.

Seth Shostak, Instituto SETI.

Neil Shubin, profesor de biología y anatomía de los organismos en la Universidad de Chicago, autor de *Your Inner Fish*.

Paul Shuch, director ejecutivo emérito de la Liga SETI.

Peter Singer, autor de *Wired for War*, Instituto Brookings.

Simon Singh, autor de *Big Bang*.

Gary Small, coautor de *iBrain*.

Paul Spudis, «Programa de Geología Planetaria» de la Oficina de Ciencia Espacial, División del Sistema Solar, de la NASA.

Steven Squyres, profesor de astronomía, Universidad de Cornell.

Paul Steinhardt, profesor de física en la Universidad de Princeton, coautor de *Endless Universe*.

Gregory Stock, UCLA, autor de *Redesigning Humans*.

Richard Stone, *The Last Great Impact on Earth*, revista *Discover*.

Brian Sullivan, antes en el Planetario Hayden.

Leonard Susskind, profesor de física, Universidad de Stanford.

Daniel Tammet, sabio autista, autor de *Nacido en un día azul*.

Geoffrey Taylor, físico, Universidad de Melbourne.

Ted Taylor (†), diseñador de ojivas atómicas.

Max Tegmark, físico, MIT.

Alvin Toffler, autor de *La tercera ola*.

Patrick Tucker, World Future Society.

Stansfield M. Turner, almirante, antiguo director de Inteligencia Central.

Chris Turney, Universidad de Exeter, Reino Unido, autor de *Ice, Mud and Blood*.

Neil deGrasse Tyson, director del Planetario Hayden.

Sesh Velamoor, Foundation for the Future.

Robert Wallace, coautor de *Spycraft*, antiguo director de la Oficina de Servicios Técnicos de la CIA.

Kevin Warwick, cyborgs humanos, Universidad de Reading, Reino Unido.

Fred Watson, astrónomo, autor de *Stargazer*.

Mark Weiser (†), Xerox PARC.

Alan Weisman, autor de *El mundo sin nosotros*.

Daniel Werthimer, SETI at Home, Universidad de California en Berkeley.

Mike Wessler, científico que trabajó en el Laboratorio de Inteligencia Artificial (AI Lab) del MIT.

Arthur Wiggins, autor de *The Joy of Physics*.

Anthony WynshawBoris, Institutos Nacionales de la Salud.

Carl Zimmer, escritor de divulgación científica, autor de *Evolution*.

Robert Zimmerman, autor de *Adiós a la Tierra*.

Robert Zubrin, fundador de la Mars Society.

Introducción

Una predicción para los próximos 100 años



Los imperios del futuro serán imperios de la mente.

WINSTON CHURCHILL

EN MI INFANCIA tuve dos experiencias que contribuyeron a formar la persona que soy actualmente y suscitaron dos pasiones que han marcado toda mi vida.

En primer lugar, recuerdo que, cuando tenía ocho años, vi a todos los profesores alborotados con la noticia de que un gran científico acababa de morir. Aquella noche los periódicos publicaban una fotografía de su despacho en la que se veía un manuscrito inacabado sobre la mesa. El pie de foto decía que el científico más grande de nuestra era no había podido acabar la más importante de sus obras maestras. Y yo me pregunté: ¿Qué cosa podría ser tan difícil como para que un científico de su talla no pudiera acabarla? ¿Qué podía ser tan complicado e importante? Esto me resultaba más intrigante que cualquier crimen misterioso y más fascinante que cualquier historia de aventuras. Tenía que averiguar qué había en aquel manuscrito inacabado.

Más tarde descubrí que el nombre del científico era Albert Einstein, y que el manuscrito inconcluso estaba destinado a ser el logro que coronaría su carrera, su intento de crear una «teoría del todo», una fórmula, quizá de no más de dos centímetros de longitud, que desvelaría los secretos del universo y le permitiría, tal vez, «leer la mente de Dios».

La otra experiencia trascendental de mi infancia surgió mientras miraba los programas que emitía la televisión los sábados por la mañana, especialmente la serie *Flash Gordon*, en la que trabajaba Buster Crabbe. Cada semana, con la nariz pegada a la pantalla del televisor, me sentía transportado como por arte de magia a un mundo misterioso de alienígenas, naves espaciales, batallas con armas que disparaban rayos, ciudades sumergidas y monstruos diversos. Me convertí en un adicto a estas cosas. Se trataba de mi primera toma de contacto con el mundo del futuro. Desde entonces, no he dejado de sentir una especie de asombro infantil cada vez que reflexiono sobre el futuro.

Sin embargo, después de haber visto todos los episodios de la serie, empecé a darme cuenta de que, aunque Flash se llevaba todo el mérito en la pantalla, en realidad era un científico llamado doctor Zarkov quien hacía que la serie funcionase. Él había inventado la nave espacial, el escudo de invisibilidad, la fuente de energía

para la ciudad situada en el espacio, etcétera. Sin un científico no hay futuro. Los guapos y atractivos personajes pueden ganarse la admiración de la sociedad, pero todas las invenciones maravillosas relacionadas con el futuro son consecuencia del trabajo de científicos anónimos que no reciben por ello elogio alguno.

Posteriormente, cuando estaba ya en el instituto de secundaria, decidí seguir los pasos de estos grandes científicos y poner a prueba algunas de las cosas que había aprendido. Quería participar en esta gran revolución que, a mi entender, cambiaría el mundo. Decidí fabricar un acelerador de partículas atómicas. Pedí a mi madre permiso para construir un acelerador de entre 2 y 3 millones de electronvoltios en el garaje. Mi madre se asustó un poco, pero me dio su conformidad. A continuación, acudí a Westinghouse y Varian Associates, conseguí 181 kilos de acero para transformadores y 35,4 kilómetros de cable de cobre, y monté un acelerador de betatrones en el garaje de mi madre.

Con anterioridad había construido una cámara de niebla dotada de un poderoso campo magnético y había fotografiado trayectorias de antimateria. Pero fotografiar la antimateria no era suficiente. Mi objetivo era producir un haz de antimateria. Las bobinas magnéticas del acelerador de partículas conseguían generar un potentísimo campo magnético de 10.000 gauss (unas 20.000 veces el campo magnético terrestre, lo cual, en principio, sería suficiente para arrancarle a cualquiera un martillo de la mano). La máquina chupaba 6 kilovatios de potencia, que era todo lo que la instalación de mi casa podía proporcionar. (Mi pobre madre se preguntaría por qué no le había salido un hijo de los que se conforman con jugar al fútbol).

Dos pasiones me han motivado durante toda mi vida: el deseo de comprender las leyes físicas del universo dentro de una única teoría coherente, y el deseo de ver el futuro. Finalmente me di cuenta de que ambas pasiones eran en realidad complementarias. La clave para entender el futuro es comprender las leyes fundamentales de la naturaleza y aplicarlas luego a los inventos, máquinas y terapias que redefinirán nuestra civilización en un futuro lejano.

Ya sé que se han realizado numerosos intentos de predecir el futuro, muchos de ellos útiles e ingeniosos. Sin embargo, quienes han escrito sobre este tema son en su mayoría historiadores, sociólogos, autores de ciencia ficción y «futurólogos», en definitiva, intrusos que predicen el mundo científico sin tener un conocimiento directo de la ciencia en sí misma. Los que no son profanos en la materia, es decir, los científicos que realmente están creando el futuro en sus laboratorios, se encuentran demasiado ocupados haciendo progresos y, por lo tanto, no tienen tiempo para escribir libros de divulgación sobre el futuro.

Esta es la razón por la cual este libro es diferente. Espero poder transmitir la perspectiva del experto al explicar cuáles son los descubrimientos prodigiosos que nos esperan, y proporcionar así una visión auténtica y autorizada de lo que será el mundo en 2100.

Por supuesto, es imposible predecir el futuro con una precisión total. En mi opinión, lo mejor que se puede hacer es entrar en las mentes de los científicos que trabajan en la vanguardia de la investigación y están llevando a cabo la grandiosa tarea de inventar el futuro. Son ellos quienes están creando los aparatos, inventos y terapias que revolucionarán la civilización. Este libro narra su historia. He tenido la oportunidad de ocupar un asiento en la primera fila de esta gran revolución, entrevistando para la televisión y la radio nacionales a más de 300 científicos del más alto nivel. También he llevado equipos de televisión a sus laboratorios para filmar los prototipos de los curiosos artefactos que cambiarán nuestro futuro. He tenido el excepcional honor de presentar numerosos programas científicos especiales para BBCTV, Discovery Channel y Science Channel, describiendo en ellos a grandes rasgos los notables inventos y descubrimientos de aquellos visionarios que se atreven a crear el futuro. Con la libertad de proseguir mi trabajo sobre la teoría de cuerdas, al tiempo que espío las investigaciones punteras que revolucionarán el presente siglo, creo que tengo una de las profesiones más apetecibles que existen en la ciencia. Es mi sueño de la infancia hecho realidad.

Sin embargo, este libro es diferente de los que he escrito con anterioridad. En libros tales como *Beyond Einstein*, *Hiperespacio* y *Universos paralelos*, hablé sobre los frescos y revolucionarios vientos que barren mi campo, el de la física teórica, y están abriendo nuevas vías para la comprensión del universo. En *Física de lo imposible*, comenté cómo los últimos descubrimientos de la física pueden hacer que incluso los esquemas más fantasiosos de la ciencia ficción lleguen algún día a ser posibles.

Este libro se parece más a *Visiones*, una obra en la que especulé sobre el modo en que evolucionará la ciencia durante las próximas décadas. Me llena de satisfacción el hecho de que muchas de las predicciones realizadas en ese libro se estén cumpliendo según el calendario previsto. La exactitud de lo dicho en mi libro ha sido consecuencia, en gran medida, de la sabiduría y la perspicacia de los numerosos científicos que entrevisté antes de escribirlo.

Pero el presente libro adopta una perspectiva mucho más amplia por lo que respecta al futuro, porque discute las tecnologías que pueden desarrollarse durante 100 años y que determinarán finalmente el destino de la humanidad. El modo en que gestionemos los desafíos y las oportunidades que surjan en los próximos 100 años determinará la trayectoria final de la especie humana.

PREDECIR EL PRÓXIMO SIGLO

Predecir unos pocos años futuros es una tarea que da miedo, y no digamos si se trata del próximo siglo. Sin embargo, hay algo que nos incita a soñar con aquellas tecnologías que un día cambiarán el destino de la humanidad.

En 1863, el gran novelista Jules Verne emprendió el que sería quizá su más ambicioso proyecto. Escribió una novela profética titulada *París en el siglo XX*, en la que aplicó plenamente su enorme talento para predecir lo que sucedería en el siglo siguiente. Por desgracia, el manuscrito se perdió en la noche de los tiempos, hasta que su bisnieto lo encontró accidentalmente en una caja fuerte que había estado cerrada durante casi 130 años. Consciente de que había dado con un auténtico tesoro, dio todos los pasos necesarios para que fuera publicado, y el libro vio la luz en 1994, convirtiéndose en un éxito de ventas.

Si nos remontamos a aquel año de 1863, hay que decir que entonces los reyes y emperadores todavía gobernaban antiguos imperios, mientras unos campesinos paupérrimos se mataban a trabajar en los campos. Estados Unidos se consumía en una guerra civil que dejó el país casi destrozado, y las máquinas de vapor empezaban a revolucionar el mundo. Pero Verne predijo que París en 1960 tendría rascacielos de cristal, aire acondicionado, televisión, ascensores, trenes de alta velocidad, automóviles que funcionarían con gasolina, aparatos de fax e incluso algo parecido a internet. Verne describió la vida en el París moderno con una exactitud asombrosa.

No se trataba de una casualidad, porque unos pocos años más tarde realizó otra predicción espectacular. En 1865 escribió *De la Tierra a la Luna*, una novela en la que predecía los detalles de la misión que enviaría a nuestros astronautas a la Luna más de cien años después, en 1969. Predijo las dimensiones de la cápsula espacial con solo un pequeñísimo porcentaje de error; la ubicación del lugar de lanzamiento en Florida, no lejos de Cabo Cañaveral; el número de astronautas que participarían en la misión; la duración del viaje; la ingravidez a la que estarían sometidos los astronautas, y el amerizaje final en el océano. (El único error importante fue decir que se utilizaría pólvora para llevar a los astronautas a la Luna, en vez de combustible para cohetes espaciales. Pero los cohetes propulsados mediante combustible líquido no se inventarían hasta setenta años más tarde).

¿Cómo pudo Jules Verne predecir con tan asombrosa exactitud lo que sucedería 100 años más tarde? Sus biógrafos han destacado que, aunque Verne no era un científico, buscaba constantemente hombres de ciencia a los que acribillar a preguntas sobre sus visiones del futuro. Confeccionó un amplio archivo en el que recopiló informaciones sobre los grandes descubrimientos científicos de su época. Verne superó a otros en perspicacia para ver que la ciencia era el motor que haría temblar los cimientos de la civilización, impulsándola a un nuevo siglo lleno de maravillas y milagros inesperados. La clave de la visión y de la aguda perspicacia de Verne está en su capacidad de comprender que la ciencia tiene el poder necesario para revolucionar la sociedad.

Otro gran profeta de la tecnología fue Leonardo da Vinci, pintor, pensador y visionario. A finales del siglo XV, Leonardo dibujó unos bellos y precisos diseños de máquinas que algún día llenarían los cielos: esbozos de paracaídas, helicópteros, planeadores e incluso aviones. Hay que decir que muchos de sus inventos hubieran

podido volar. (Sin embargo, sus máquinas voladoras necesitaban un ingrediente más: un motor de al menos un caballo de potencia, algo que no llegaría a existir hasta 400 años después).

Otra cosa que resulta igualmente asombrosa es que Leonardo diseñó el prototipo de una calculadora mecánica, adelantándose así en unos 150 años a su época. En 1967, el análisis de un manuscrito que había estado extraviado reveló el proyecto de una máquina calculadora provista de trece ruedas digitales. Al girar una manivela, los engranajes interiores giraban sucesivamente realizando operaciones aritméticas. (En 1968 se construyó un prototipo de la máquina, y esta funcionó).

Además, en la década de 1950 se descubrió otro manuscrito que contenía el esbozo de un autómata. Se trataba de un guerrero que llevaba una armadura germanoitaliana, podía sentarse y movía los brazos, el cuello y la mandíbula. También en este caso se construyó el autómata y se vio que funcionaba.

Al igual que Jules Verne, Leonardo fue capaz de captar una profunda visión del futuro después de consultar con individuos de su época que tenían un pensamiento avanzado. Formaba parte de un pequeño círculo de personas que estaban en la vanguardia de la innovación. Además, Leonardo siempre estaba experimentando, construyendo y diseñando modelos, actividad fundamental para cualquiera que desee trasladar las ideas a la realidad.

A la vista de las grandiosas ideas proféticas de Verne y Leonardo, nos planteamos la siguiente pregunta: ¿Es posible predecir el mundo de 2100? Continuando la tradición de ambos genios, este libro examinará detenidamente la obra de los científicos más destacados que están construyendo los prototipos de las tecnologías que cambiarán nuestro futuro. No se trata de una obra de ficción, y tampoco es producto de la imaginación calenturienta de un guionista de Hollywood, sino que está basado en la sólida actividad científica que se lleva a cabo actualmente en laboratorios importantes de todo el mundo.

Los prototipos de todas estas tecnologías existen ya. Como dijo una vez William Gibson, autor de *Neuromante*, que acuñó la palabra *ciberespacio*: «El futuro ya está aquí. Lo que pasa es que está distribuido de manera desigual».

Predecir el mundo de 2100 es una tarea abrumadora, ya que estamos en una época de gran efervescencia en el mundo de la ciencia, y la velocidad a la que se producen los descubrimientos es cada vez mayor. Durante las últimas décadas se ha acumulado más conocimiento que en toda la historia de la humanidad. Y en 2100 este conocimiento científico se habrá duplicado muchas veces.

La mejor manera de imaginarse la ingente tarea que supone predecir los próximos 100 años es quizá recordar cómo era el mundo en 1900 y cómo vivieron nuestros abuelos.

El periodista Mark Sullivan nos propone que imaginemos a alguien leyendo un periódico en el año 1900:

> “ En la prensa del 1 de enero de 1900[1], los estadounidenses no encontraban palabras tales como «radio», porque todavía faltaban veinte años para que este invento llegara; tampoco aparecía «película», porque también esto pertenecía aún al futuro; ni «chófer», porque el automóvil no había hecho más que nacer y se llamaba «coche sin caballos». […] No existían palabras tales como «aviador». […] Los granjeros no habían oído hablar de los tractores, ni los banqueros de la Reserva Federal. Los comerciantes no habían oído nada sobre cadenas de almacenes, ni sobre autoservicios; ni los marinos sobre motores de combustión. […] En las carreteras rurales se veían todavía yuntas de bueyes. […] Era prácticamente universal el uso de caballos o mulas para los vehículos de transporte de mercancías. […] La imagen del herrero trabajando bajo el amplio ramaje de un castaño pertenecía al mundo de lo real.

Para comprender la dificultad que entraña la predicción de los próximos 100 años, hemos de valorar las dificultades que tenía la gente de 1900 para predecir cómo sería el mundo del año 2000. En 1893, dentro del programa de la Exposición Mundial Colombina que se celebró en Chicago, se pidió a setenta y cuatro personalidades famosas que predijeran cómo sería la vida durante los cien años siguientes. Un problema fue que subestimaron considerablemente la velocidad a la que iba a avanzar la ciencia. Por ejemplo, muchos de ellos predijeron con acierto que un día habría aeronaves transatlánticas comerciales, pero pensaban que estas serían globos. El senador John J. Ingalls dijo: «Para cualquier ciudadano será tan normal pedir su globo dirigible como lo es ahora pedir su calesa o sus botas[2]». También fallaron en gran medida con respecto a la llegada del automóvil. El director general de Correos, John Wanamaker, afirmó que, incluso pasados 100 años, en Estados Unidos el correo seguiría transportándose en diligencia y a caballo.

Esta infravaloración de la ciencia y de los avances innovadores se puso de manifiesto incluso en la Oficina de Patentes. En 1899, Charles H. Duell, comisario de la Oficina de Patentes de Estados Unidos, dijo: «Todo lo que se puede inventar está ya inventado[3]».

A veces, algunos expertos han subestimado lo que estaba sucediendo ante sus narices dentro de su propia especialidad. En 1927, en la época del cine mudo, Harry M. Warner, uno de los fundadores de Warner Brothers, observó: «¿Quién demonios va a querer oír hablar a los actores?»[4].

Y Thomas Watson, presidente de IBM, dijo en 1943: «Creo que el mercado mundial da como mucho para cinco computadoras[5]».

Esta infravaloración del poder de los descubrimientos científicos llegó incluso al venerable *New York Times*. (En 1903, el *Times* afirmó que las aeronaves eran una pérdida de tiempo, justo una semana antes de que los hermanos Wright lograran que su aeroplano volara en Kitty Hawk, Carolina del Norte. En 1920, el *Times* criticó al

científico Robert Goddard, experto en naves espaciales, afirmando que su trabajo no tenía sentido, porque los cohetes no podían desplazarse en el vacío. Cuarenta y nueve años más tarde, cuando los astronautas del *Apolo 11* aterrizaron en la Luna, el *Times* se retractó, cosa que le honra: «Ahora queda demostrado de manera irrevocable que un cohete puede funcionar en el vacío. El *Times* lamenta su error»)[6].

Esto nos enseña que es muy peligroso apostar en contra del futuro.

Las predicciones sobre el futuro, con unas pocas excepciones, siempre han subestimado el avance del progreso tecnológico. Se nos dice una y otra vez que son los optimistas quienes escriben la historia, no los pesimistas. Como dijo en una ocasión el presidente Dwight Eisenhower: «El pesimismo nunca ha ganado una guerra».

Podemos ver cómo incluso los escritores de ciencia ficción infravaloran el avance de los descubrimientos científicos. Si usted ve reposiciones de la vieja serie de televisión *Star Trek* de la década de 1960, observará que gran parte de las «tecnologías del siglo XXIII» están ya presentes. Pero en aquellos tiempos las audiencias televisivas se sorprendieron al ver teléfonos móviles, ordenadores portátiles, aparatos que podían hablar y máquinas de escribir que recogían el texto al dictado. Sin embargo, todas estas tecnologías existen ya actualmente. Pronto dispondremos asimismo de versiones del traductor universal, que puede traducir rápidamente de un idioma a otro a medida que se habla, y también *tricorders* o «tricodificadores», que pueden diagnosticar enfermedades a distancia. (Excepto los motores y vehículos basados en el empuje *warp*[*], gran parte de la ciencia del siglo XXIII ha llegado ya).

Dados los errores evidentes que se han cometido al subestimar el futuro, ¿cómo podemos empezar a configurar una base científica sólida para nuestras predicciones?

LA COMPRENSIÓN DE LAS LEYES DE LA NATURALEZA

Hoy en día, por lo que respecta a la ciencia, no vivimos ya en la edad de las tinieblas, cuando se pensaba que los relámpagos y las plagas eran obra de los dioses. Gozamos de una gran ventaja que Jules Verne y Leonardo da Vinci no tuvieron: un conocimiento sólido de las leyes de la naturaleza.

Las predicciones siempre tendrán fallos, pero un procedimiento para que resulten lo más fiables posible consiste en comprender las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza que actúan en el universo. Cada vez que se ha comprendido y explicado una de ellas, ha cambiado la historia de la humanidad.

La primera fuerza para la que se encontró una explicación fue la fuerza de la gravedad. Isaac Newton nos proporcionó una mecánica que nos podía explicar el movimiento de los objetos recurriendo a las fuerzas, y no a los espíritus místicos o a

la metafísica. Esto contribuyó a preparar el camino hacia la revolución industrial con la utilización de la fuerza del vapor, en especial la fuerza locomotriz.

La segunda fuerza que se conoció fue la fuerza electromagnética, que ilumina nuestras ciudades y acciona nuestros aparatos. Cuando Thomas Edison, Michael Faraday, James Clerk Maxwell y otros explicaron la electricidad y el magnetismo, se desencadenó la revolución electrónica, que ha creado una generosa cantidad de maravillas científicas. Somos conscientes de ello cada vez que sufrimos un apagón eléctrico y vemos que la sociedad retrocede de golpe 100 años al pasado.

La tercera y la cuarta fuerza que se conocieron fueron las dos fuerzas nucleares: la fuerza débil y la fuerza fuerte. Cuando Einstein escribió $E=mc^2$, y cuando se fisionó el átomo en la década de 1930, los científicos empezaron a comprender por primera vez las fuerzas que iluminan los cielos. Se reveló el secreto escondido tras las estrellas. Este conocimiento no solo desató el terrorífico poder de las armas atómicas, sino que también trajo la promesa de que algún día seríamos capaces de aprovechar esta energía en nuestro planeta.

Hoy en día tenemos un conocimiento bastante bueno de estas cuatro fuerzas. La primera de ellas, la gravedad, se explica actualmente mediante la teoría de la relatividad general de Einstein, mientras que las otras tres se explican aplicando la teoría cuántica, que nos permite decodificar los secretos del mundo subatómico.

A su vez, la teoría cuántica nos ha proporcionado el transistor, el láser y la revolución digital, que es la fuerza impulsora de nuestra sociedad moderna. De manera similar, los científicos han logrado utilizar la teoría cuántica para desvelar el secreto de la molécula de ADN. La deslumbrante velocidad a la que avanza la revolución tecnológica es un resultado directo de la tecnología informática, ya que la obtención de secuencias de ADN se realiza mediante máquinas, robots y ordenadores.

En consecuencia, estamos mejor capacitados para ver qué dirección tomarán la ciencia y la tecnología durante el próximo siglo. Surgirán continuamente nuevas sorpresas totalmente inesperadas que nos dejarán sin habla, pero los fundamentos de la física, la química y la biología modernas están ya ampliamente establecidos, y no esperamos ninguna revisión importante de estos conocimientos básicos, al menos en un futuro previsible. Así pues, las predicciones que se realizan en este libro no son producto de una especulación salvaje, sino que son estimaciones razonadas sobre el momento en que las tecnologías prototípicas de hoy en día alcanzarán finalmente la madurez.

La conclusión es que existen varias razones para creer que podemos ver un esbozo de lo que será el mundo en el año 2100:

1. Este libro está basado en entrevistas con más de 300 científicos del más alto nivel, es decir, con aquellos que están en la vanguardia de los descubrimientos.

2. Todos los avances científicos mencionados en este libro son coherentes con las leyes de la física conocidas actualmente.
3. Las cuatro fuerzas y las leyes fundamentales de la naturaleza se conocen ampliamente; no es de esperar que se vaya a producir ningún cambio importante en estas leyes.
4. Existen ya prototipos de todas las tecnologías mencionadas en este libro.
5. Este libro lo escribe un «experto» que posee una visión de primera mano de las tecnologías que están en la vanguardia de la investigación.

Durante muchísimo tiempo no fuimos más que espectadores pasivos ante la danza de la naturaleza. Contemplábamos maravillados y temerosos los cometas, los relámpagos, las erupciones volcánicas y las plagas, asumiendo que todo esto estaba más allá de nuestra capacidad de comprender. Para los antiguos, las fuerzas de la naturaleza eran un eterno misterio que había que temer y venerar, por lo que crearon a los dioses de la mitología para dar un sentido al mundo que les rodeaba. Esperaban que, rezando a aquellos dioses, estos mostrarían su clemencia y les concederían sus más ardientes deseos.

Hoy en día nos hemos convertido en coreógrafos de la danza de la naturaleza y somos capaces de dar un pellizco a sus leyes aquí y allá. Pero para el año 2100 habremos conseguido convertirnos en los amos de la naturaleza.

2100: SEREMOS DIOSES MITOLÓGICOS

Si hoy en día pudiéramos visitar a nuestros antepasados más remotos y mostrarles toda nuestra profusión de avances científicos y tecnológicos, nos tomarían por magos. Con la magia de la ciencia podríamos mostrarles aeroplanos que se elevan hasta surcar las nubes, naves espaciales que pueden explorar la Luna y los planetas, escáneres de resonancia magnética que pueden mirar el interior del cuerpo humano y teléfonos móviles que nos ponen en contacto con cualquier habitante del planeta. Si les enseñáramos nuestros ordenadores portátiles que envían de forma instantánea imágenes en movimiento y mensajes a través de los continentes, dirían que todo eso es brujería.

Pero esto no es más que el comienzo. La ciencia no es estática. Explora exponencialmente todo nuestro entorno. Si hacemos un recuento del número de artículos científicos que se publican, veremos que el volumen total de la ciencia se duplica más o menos cada diez años. Las innovaciones y los descubrimientos están cambiando en su totalidad el panorama económico, político y social, dando un vuelco a los viejos y queridos prejuicios y creencias.

Ahora, atrevámonos a imaginar el mundo del año 2100.

Nuestro destino para el año 2100 es igualarnos a los dioses que en otro tiempo adorábamos y temíamos. Pero no nos valdremos de pociones y varitas mágicas, sino de la informática, la nanotecnología, la inteligencia artificial, la biotecnología y, sobre todo, la teoría cuántica, que es el fundamento de todas las tecnologías anteriores.

En 2100, al igual que los dioses mitológicos, seremos capaces de manipular objetos con el poder de nuestras mentes. Los ordenadores podrán hacer realidad nuestros deseos, tras leer en silencio nuestros pensamientos. Podremos mover objetos utilizando solo la mente, es decir, tendremos un poder telequinético que habitualmente está reservado a los dioses. Con el poder de la biotecnología crearemos cuerpos perfectos y alargaremos nuestro tiempo de vida. También seremos capaces de crear formas de vida nunca vistas en la superficie de nuestro planeta. Con el poder de la nanotecnología podremos tomar un objeto y convertirlo en otra cosa, para crear algo aparentemente a partir casi de la nada. No viajaremos en carros llameantes, sino en impecables vehículos que volarán por sí mismos casi sin combustible, flotando sin esfuerzo en el aire. Con nuestros motores seremos capaces de aprovechar la energía ilimitada de las estrellas. También estaremos a punto de poder enviar naves interestelares para explorar estrellas cercanas.

Aunque este poder divino parece increíblemente avanzado, las semillas de todas estas tecnologías ya están sembrándose ahora mismo. Es la ciencia moderna, no salmodias, ni encantamientos, lo que nos dará este poder.

Soy especialista en física cuántica. A diario me enfrento con las fórmulas que gobiernan las partículas subatómicas de las que está hecho el universo. El mundo en el que vivo es el universo del hiperespacio de once dimensiones, los agujeros negros y las puertas al multiverso. Pero las fórmulas de la teoría cuántica que se utilizan para describir las estrellas que explotan y el *big bang* pueden utilizarse también para descifrar esquemáticamente nuestro futuro.

Ahora bien, ¿adónde nos conducen todos estos cambios tecnológicos? ¿Dónde está el destino final de este largo viaje a la ciencia y la tecnología?

La culminación de toda esta efervescencia es la creación de una civilización planetaria, lo que los físicos llaman una civilización del tipo I. Esta transición es quizá la más importante que se ha dado en la historia, y marca un despegue radical con respecto a todas las civilizaciones del pasado. Cada titular que encabeza las noticias refleja, en cierto modo, los dolores del parto de esta civilización planetaria. El comercio, la industria, la cultura, el lenguaje, los espectáculos, las actividades de ocio e incluso la guerra están experimentando una revolución a causa de la emergencia de esta civilización planetaria. Calculando el rendimiento energético del planeta, se estima que alcanzaremos la situación de tipo I dentro de 100 años. A menos que sucumbamos a las fuerzas del caos y la insensatez, la transición a una civilización planetaria es inevitable, porque esta es el producto final de las enormes e inexorables fuerzas de la historia y la tecnología, que están más allá de todo control.

Sin embargo, varias predicciones relativas a la era de la información resultaron espectacularmente falsas. Por ejemplo, muchos futurólogos predijeron la «oficina sin papeles», es decir, que el ordenador haría que el papel fuera obsoleto. En realidad, ha sucedido lo contrario. Basta con echar un vistazo a cualquier oficina para ver que la cantidad de papeles es ahora mayor que nunca.

Algunos también pronosticaron la «ciudad sin gente». Varios futurólogos predijeron que las teleconferencias vía internet harían innecesaria la presencia física en las reuniones de negocios, por lo que no sería necesario desplazarse. De hecho, las poblaciones urbanas se quedarían en gran medida vacías, convirtiéndose en ciudades fantasma, ya que la gente trabajaría en casa en vez de acudir a la oficina.

De igual modo, veríamos el aumento de los «ciberturistas»: comodones que se pasarían el día tumbados en el sofá, recorriendo el mundo y viendo los lugares de interés turístico a través de internet en sus ordenadores. También tendríamos «cibercompradores», que dejarían para el ratón del ordenador el esfuerzo de caminar. Las avenidas comerciales irían a la quiebra. Asimismo, los «ciberestudiantes» recibirían todas las clases en línea, divirtiéndose a escondidas con los videojuegos y bebiendo cerveza. Las universidades cerrarían, porque ya no interesarían a nadie.

Por otra parte, pensemos en el destino del «teléfono con imagen». Durante la Feria Mundial de 1964, AT&T se gastó unos 100 millones de dólares en perfeccionar una pantalla de televisión que se conectaría al teléfono, de tal modo que pudiéramos ver a la persona con la que estábamos hablando, y viceversa. El invento nunca llegó a cuajar; AT&T solo vendió unos 100 aparatos de este tipo, con lo que cada unidad le costó alrededor de un millón de dólares. El fracaso resultó muy caro.

Y, finalmente, se pensó que la defunción de los medios de comunicación y los espectáculos tradicionales de ocio era inminente. Algunos futurólogos proclamaron que internet sería el monstruo devorador que se tragaría las representaciones de teatro en directo, el cine, la radio y la televisión, y que todo esto ya solo se vería en los museos.

En realidad, ha sucedido lo contrario. Por lo que respecta al tráfico, los embotellamientos son peores que nunca, habiéndose convertido en una característica permanente de la vida urbana. Se han batido todos los récords en el número de personas que se desplazan en tropel al extranjero, haciendo del turismo una de las industrias de más rápido crecimiento. Los compradores abarrotan los centros comerciales, a pesar de la grave crisis económica. En vez de una proliferación de aulas cibernéticas, lo que vemos es que las universidades siguen registrando unas cifras de estudiantes superiores a las de cualquier otra época. Es cierto que cada vez más gente decide trabajar desde sus hogares o conferenciar a distancia con sus colegas, pero las ciudades no se han vaciado en absoluto. Al contrario, se han transformado en megaurbes que no dejan de crecer. Hoy en día resulta fácil tener una

conversación visual a través de internet, pero la mayoría de la gente es reticente a ser filmada y prefiere los encuentros cara a cara. Y, por supuesto, internet ha cambiado radicalmente el paisaje de los medios de comunicación, ya que los gigantes de dichos medios han descubierto el modo de sacar beneficios de la red. Internet está muy lejos de acabar con la televisión, la radio y el teatro en directo. Las luces de Broadway siguen brillando con tanto fulgor como antes.

EL PRINCIPIO DEL HOMBRE DE LAS CAVERNAS

¿Por qué no han llegado a materializarse aquellas predicciones? Creo que la gente ha rechazado ampliamente esos adelantos por lo que yo llamo el Principio del Hombre de las Cavernas (o de la Mujer de las Cavernas). Todos los indicios genéticos y fósiles ponen de manifiesto que los seres humanos modernos, que tenían exactamente el mismo aspecto que nosotros, surgieron de África hace más de 100.000 años, pero no vemos prueba alguna de que nuestros cerebros y nuestra personalidad hayan cambiado mucho desde entonces. Cualquier individuo de aquella época sería anatómicamente idéntico a nosotros; si le diéramos un baño y un buen afeitado, le pusiéramos un traje de tres piezas y lo colocáramos en Wall Street, por su físico no se distinguiría de cualquier otro individuo de la zona. Del mismo modo, nuestros deseos, sueños, personalidades y aspiraciones probablemente no habrán cambiado mucho en 100.000 años. Es muy posible que pensemos todavía como nuestros antepasados de las cavernas.

La cuestión es la siguiente: cuando se produce un conflicto entre la tecnología moderna y los deseos de nuestros primitivos antepasados, los deseos primitivos siempre ganan. Este es el Principio del Hombre de las Cavernas. Por ejemplo, el hombre de las cavernas siempre exigía «comprobar la pieza cazada». Nunca bastaba con presumir de la pieza grande que se había escapado. Tener el animal entre las manos era siempre preferible a las historias sobre uno que hubiera huido. De igual modo, queremos la copia en papel cuando manejamos archivos. Instintivamente desconfiamos de los electrones que flotan en la pantalla del ordenador y, por eso, imprimimos nuestros correos electrónicos y nuestros informes, incluso cuando no es necesario. Esta es la razón por la cual la oficina sin papeles nunca se ha hecho realidad.

Asimismo, a nuestros antepasados siempre les gustaron los encuentros cara a cara. Eran buenos para establecer vínculos con los demás y leer sus emociones ocultas. Es la razón por la que nunca ha llegado a existir una ciudad vacía de gente. Por ejemplo, un jefe podría desear evaluar detenidamente a sus empleados. Es difícil hacer eso en línea, pero en una entrevista cara a cara un jefe puede leer el lenguaje corporal para obtener una valiosa información ofrecida de manera inconsciente. Al observar de cerca a las personas, sentimos un vínculo común y podemos también leer

su sutil lenguaje corporal para averiguar qué pensamientos pasan por sus cabezas. Esta es la razón por la cual nuestros simiescos antepasados, muchos miles de años antes de desarrollar el lenguaje oral, utilizaban casi exclusivamente el lenguaje corporal para transmitir sus pensamientos y sus emociones.

Es la causa de que el ciberturismo nunca haya arrancado. Una cosa es ver una fotografía del Taj Mahal, pero otra es presumir del privilegio de haberlo visto realmente. De igual modo, que usted oiga un CD de su músico favorito no es lo mismo que el arrebato de emoción que sentiría al ver en la realidad a ese músico en un concierto en directo, rodeado de toda la fanfarria, gritos y ruido. Esto indica que, aunque podamos descargar unas imágenes muy realistas de nuestra obra de teatro preferida o nuestro artista famoso predilecto, no es comparable a ver el drama directamente sobre el escenario y al actor representándolo en persona. Los fans recorren grandes distancias para conseguir fotografías dedicadas y entradas para los conciertos de sus artistas favoritos, aunque puedan descargar una fotografía gratuitamente de internet.

Esto explica por qué nunca se ha hecho realidad la predicción según la cual internet acabaría con la televisión y la radio. Cuando aparecieron por primera vez la radio y el cine, la gente vaticinó la muerte del teatro en directo. Cuando llegó la televisión, se predijo la defunción de la radio y el cine. Ahora vivimos con una mezcla de todos estos medios. La lección es que un medio nunca aniquila a otro previo, sino que coexiste con él. Es la mezcla y la relación mutua de estos medios lo que cambia constantemente. Quien pueda predecir con exactitud la mezcla de medios que se dará en el futuro podrá hacerse rico.

La razón de esto es que nuestros primitivos antepasados siempre querían ver las cosas por sí mismos, porque no se fiaban de lo que se contaba. Confiar en las pruebas físicas reales más que en los rumores fue crucial para nuestra supervivencia en la selva. Cuando haya pasado un siglo a partir del momento presente, seguiremos disfrutando del teatro en vivo y persiguiendo a los artistas famosos, y eso será una antigua herencia de nuestro pasado lejano.

Además, somos descendientes de seres depredadores que cazaban. Por lo tanto, nos gusta observar a los demás e incluso sentarnos durante horas frente a un televisor, mirando durante una eternidad las payasadas que hacen nuestros semejantes, pero nos ponemos nerviosos en cuanto sentimos que otros nos miran. De hecho, unos científicos han comprobado que nos ponemos nerviosos solo con que un extraño nos observe fijamente durante más o menos cuatro segundos. Si esto dura unos diez segundos, nos sentimos incluso furiosos y nos mostramos hostiles con el mirón. Esta es la razón por la cual la telefonía con imagen fue inicialmente un fracaso. ¿Quién quiere tener que peinarse antes de ir a coger el teléfono? (Actualmente, después de décadas de lentas y costosas mejoras, la videoconferencia está por fin empezando a ser bien aceptada).

Desde luego, hoy en día es posible hacer cursos a través de internet. Pero las universidades están abarrotadas de estudiantes. El encuentro frente a frente con los profesores, que pueden prestar una atención individual y responder a las preguntas de cada alumno, sigue siendo preferible en comparación con los cursos en línea. Y un título universitario todavía tiene más peso que un diploma en línea cuando se solicita un puesto de trabajo.

Así pues, hay una competición que no cesa entre las tecnologías avanzadas (*high tech*) y el contacto directo (*high touch*), es decir, entre sentarse en un sillón a ver la televisión y moverse para tocar las cosas que nos rodean. En esta competición, lo que nosotros desearemos será hacer ambas cosas. Queremos seguir disfrutando del teatro en vivo, los conciertos de rock, la impresión en papel y los viajes turísticos, aunque estemos en la era del ciberespacio y la realidad virtual. Pero si nos dieran a elegir entre una imagen gratuita de nuestro músico favorito y unas entradas reales para su concierto, optaríamos por las entradas, sin dudarlo ni un momento.

Es el Principio del Hombre de las Cavernas: preferimos tener ambas cosas, pero, si nos dan a elegir, optaremos por el contacto directo, como nuestros antepasados cavernícolas.

Sin embargo, este principio tiene también un corolario. Cuando los científicos crearon internet, allá por la década de 1960, mucha gente creía que evolucionaría hasta ser un foro para la educación, la ciencia y el progreso. En cambio, a otros les horrorizaba la idea de que pronto degeneraría hasta convertirse en el salvaje oeste sin frenos ni barreras que es actualmente. En realidad, esto era de esperar. El corolario del Principio del Hombre de las Cavernas es que, para predecir las interacciones sociales de los humanos en el futuro, basta con que nos imaginemos cuáles eran nuestras interacciones sociales hace 100.000 años y las multipliquemos por mil millones. Esto significa que habrá que dar un mayor peso al cotilleo, al uso de las redes sociales y al ocio. Los rumores eran esenciales en la tribu para comunicar informaciones rápidamente, sobre todo las relativas a los jefes y a quienes estaban considerados como modelos de comportamiento. Los que estaban fuera de esta espiral de cotilleo a menudo no sobrevivían para transmitir sus genes. Hoy en día podemos ver esto representado junto a las cajas de los supermercados, en unos anaqueles abarrotados de revistas dedicadas al cotilleo sobre famosos, y en el ascenso de la cultura que generan estos famosos. La única diferencia con nuestros antepasados es que actualmente los medios de comunicación han multiplicado por cifras enormes la magnitud de este cotilleo tribal, y que ahora los rumores pueden dar varias vueltas al planeta en una fracción de segundo.

La repentina proliferación de sitios web de redes sociales, que ha convertido a jóvenes empresarios imberbes en multimillonarios de la noche a la mañana, ha pillado desprevenidos a muchos analistas, pero es también un ejemplo del Principio del Hombre de las Cavernas. A lo largo de nuestra historia evolutiva, aquellos que

mantenían amplias redes de contactos sociales podían confiar en ellos para obtener los recursos, el asesoramiento y la ayuda que eran vitales para sobrevivir.

Finalmente, la oferta para el ocio y la diversión seguirá creciendo a una velocidad inimaginable. A veces no nos agrada admitirlo, pero una parte predominante de nuestra cultura está basada en el ocio y la diversión. Después de cazar, nuestros antepasados descansaban y se divertían. Estas actividades eran importantes, no solo para establecer relaciones, sino también para fijar la posición de un individuo dentro de la tribu. No es casualidad que la danza y el canto, que son partes esenciales de la diversión, sean también vitales en el reino animal para demostrar al sexo opuesto que se está en forma. Cuando los pájaros machos cantan bellas y complejas melodías, o emprenden curiosos ritos de apareamiento, se trata principalmente de demostrar al sexo opuesto que están en excelente forma física, saludables y limpios de parásitos, y que tienen unos genes que vale la pena transmitir.

Por otra parte, la creación artística no servía solo para divertirse, sino que también desempeñó un importante papel en la evolución de nuestro cerebro, que gestiona mediante símbolos la mayor parte de la información que recibe.

En definitiva, a menos que cambiemos genéticamente los fundamentos de nuestra personalidad, es de esperar que el poder de las actividades de ocio, del cotilleo en los medios y de la participación en las redes sociales no disminuya, sino que aumente en el futuro.

LA CIENCIA COMO ARMA

En una ocasión vi una película que cambió para siempre mi actitud con respecto al futuro. Se titulaba *Planeta prohibido* y estaba basada en *La tempestad* de Shakespeare. En esta película unos astronautas encontraban una antigua civilización que, en relación con la nuestra, tenía un adelanto de un millón de años. Sus miembros habían alcanzado ya su último objetivo tecnológico: un poder ilimitado que ejercían prescindiendo de cualquier instrumento, es decir, el poder de hacer casi cualquier cosa solo con la mente. Sus pensamientos iban a parar a unas colosales plantas de energía termonuclear, enterradas en las profundidades del planeta, que convertían cualquier deseo en realidad. Dicho de otro modo, tenían el poder de los dioses.

Llegaremos a gozar de un poder similar, pero no tendremos que esperar millones de años. Solo habrá que esperar un siglo, porque ya podemos ver las semillas de este futuro en la tecnología actual. Pero la película era también un cuento con moraleja, ya que aquel poder divino finalmente aplastaba a la civilización.

Por supuesto, la ciencia es un arma de doble filo; resuelve problemas, pero crea otros tantos, y estos son siempre de un nivel superior. Hoy en día hay dos tendencias que compiten en el mundo: una es la que intenta crear una civilización planetaria que sea tolerante, científica y próspera, pero la otra glorifica la anarquía y la ignorancia

que podrían desgarrar el tejido de nuestra sociedad. Seguimos teniendo el mismo sectarismo, el mismo fundamentalismo y las mismas pasiones irracionales que tenían nuestros antepasados, pero la diferencia es que ahora poseemos armas atómicas, químicas y biológicas.

En el futuro llevaremos a cabo la transición de ser observadores pasivos de la danza de la naturaleza a ser coreógrafos y, finalmente, conservadores de dicha naturaleza. Así pues, esperemos que seamos capaces de blandir la espada de la ciencia con sabiduría y ecuanimidad, dominando la barbarie de nuestro antiguo pasado.

Emprendamos ahora un hipotético viaje a través de los próximos 100 años de innovación y descubrimientos científicos, tal como me los han explicado los científicos que los están haciendo posibles. Será un vertiginoso recorrido por los rápidos avances que tendrán lugar en la informática, las telecomunicaciones, la biotecnología, la inteligencia artificial y la nanotecnología. Sin duda, todo esto cambiará nada menos que el futuro de la civilización.

1

EL FUTURO DE LOS ORDENADORES

La mente controlará la materia



> Todo individuo considera que los límites de su propia visión son los límites del mundo.
>
> ARTHUR SCHOPENHAUER

> Nunca un pesimista descubrió los secretos de las estrellas, ni navegó hacia un país que no estuviera en el mapa, ni abrió un nuevo cielo al espíritu humano.
>
> HELEN KELLER

CONSERVO UN VIVO recuerdo de cuando estuve en el despacho de Mark Weiser, en Silicon Valley, hace casi veinte años, escuchando atentamente mientras él me explicaba su visión del futuro. Sin parar de gesticular con las manos, me contó, muy emocionado, que estaba a punto de producirse una revolución que cambiaría el mundo. Weiser formaba parte de la élite informática que trabajaba en Xerox PARC (Palo Alto Research Center, un centro de investigación que fue pionero en la creación del ordenador personal, la impresora de láser y una arquitectura basada en ventanas, con interfaz gráfico de usuario), pero era un inconformista, un iconoclasta que hacía añicos la sabiduría convencional, y además era miembro de una banda de rock duro.

En aquellos tiempos (parece que ha pasado una eternidad), los ordenadores personales eran una novedad y no habían hecho más que empezar a entrar en la vida de la gente, que se iba animando lentamente a comprar aquellos aparatos voluminosos y pesados para analizar hojas de cálculo y hacer un poco de procesamiento de textos. Internet era todavía en gran medida coto privado de científicos como yo, que teníamos el capricho de enviar fórmulas a nuestros colegas en un lenguaje de arcanos. Había apasionados debates sobre si esa caja que teníamos encima de la mesa, con su mirada fría e implacable, deshumanizaría la civilización. Incluso el analista político William F. Buckley tuvo que defender el procesador de textos frente a algunos intelectuales que denostaban contra él y afirmaban que jamás tocarían un ordenador, llamándolo instrumento de los filisteos.

Fue en esta época de controversias cuando Weiser acuñó la expresión *ubiquitous computing* («informática omnipresente»). Mirando a lo lejos, más allá del ordenador

personal, Weiser predijo que, algún día, los chips llegarían a ser tan baratos y abundantes que estarían diseminados por todo nuestro entorno: en nuestras prendas de vestir, en el mobiliario, por las paredes e incluso en nuestros cuerpos. Todos ellos estarían conectados a internet, compartiendo datos, haciendo nuestras vidas más agradables, atendiendo todos nuestros deseos. Allí adonde fuéramos, los chips estarían presentes para hacer realidad silenciosamente nuestros deseos. El entorno estaría vivo.

Para su época, el sueño de Weiser era extravagante, incluso absurdo. La mayoría de los ordenadores personales eran todavía caros y ni siquiera estaban conectados a internet. La idea de que miles de millones de diminutos chips podrían algún día ser tan baratos como el agua del grifo se consideraba un disparate.

Entonces le pregunté por qué se sentía tan seguro de que iba a producirse aquella revolución. Me contestó tranquilamente que la potencia de los ordenadores estaba creciendo exponencialmente y sin que se previera límite alguno para este crecimiento. «Echa la cuenta», me sugirió. Era solo cuestión de tiempo. (Lo triste es que Weiser no vivió el tiempo suficiente para ver materializarse esta revolución, porque falleció de cáncer en 1999).

La idea motriz que subyace en los sueños proféticos de Weiser es algo que se llama la ley de Moore, una regla empírica que ha guiado a la industria informática durante cincuenta años o más, estableciendo con precisión el camino hacia una civilización moderna. La ley de Moore dice simplemente que la potencia de los ordenadores se duplica más o menos cada dieciocho meses. Esta sencilla ley, enunciada por primera vez en 1965 por Gordon Moore, uno de los fundadores de Intel Corporation, ha contribuido a revolucionar la economía mundial, ha generado unos beneficios fabulosos y ha alterado de manera irreversible nuestro modo de vida. Si trazamos una representación gráfica de los precios rápidamente descendentes de los chips, y de su raudo avance en velocidad, capacidad de procesamiento y memoria, obtenemos una línea notablemente recta que corresponde a los últimos cincuenta años. (La representación gráfica es una curva logarítmica. De hecho, si ampliamos el gráfico de tal modo que incluya la tecnología del tubo de vacío e incluso las calculadoras mecánicas de manivela, la línea puede alargarse hasta abarcar más de cien años hacia el pasado).

A veces es difícil imaginarse el crecimiento exponencial, ya que nuestras mentes piensan de manera lineal. Además, se produce de una forma tan gradual que muchas veces no somos capaces de percibir el cambio. Sin embargo, a lo largo de varias décadas puede cambiar completamente todo lo que nos rodea.

Según la ley de Moore, cada Navidad nuestros nuevos juegos de ordenador son casi el doble de potentes (en cuanto al número de transistores) que los del año anterior. Además, a medida que pasan los años, este incremento se hace enorme. Por ejemplo, cuando recibimos una felicitación de cumpleaños en el correo, la tarjeta a menudo tiene un chip que canta «Cumpleaños feliz». Lo curioso es que ese chip tiene

más potencia de ordenador que todas las fuerzas aliadas en 1945. Hitler, Churchill o Roosevelt habrían hecho cualquier cosa para conseguirlo. ¿Y qué es lo que hacemos con él? Después del cumpleaños tiramos la tarjeta y el chip a la basura. Hoy en día, un teléfono móvil tiene más potencia de ordenador que toda la NASA en 1969, cuando llevó dos astronautas a la Luna. Los videojuegos, que consumen enormes cantidades de potencia de ordenador para simular situaciones en tres dimensiones, utilizan más potencia de ordenador que los ordenadores centrales de la década pasada. La actual PlayStation de Sony, que cuesta 300 dólares, tiene la potencia de un superordenador militar de 1997, que costaba millones de dólares.

Podemos ver la diferencia entre crecimiento lineal y crecimiento exponencial de la potencia de ordenador, si analizamos el modo en que la gente veía el futuro de las computadoras en 1949, cuando *Popular Mechanics* predijo que los ordenadores crecerían linealmente en el futuro, quizá solo duplicando o triplicando su potencia con el paso del tiempo. Podía leerse lo siguiente: «Si una máquina calculadora como la ENIAC está equipada actualmente con 18.000 tubos de vacío y pesa 30 toneladas[1], las computadoras del futuro podrán tener solo 1.000 tubos de vacío y no pesarán más de una tonelada y media».

(La madre naturaleza aprecia el poder de lo exponencial. Un solo virus puede atacar una célula humana y obligarla a crear varios cientos de copias de él mismo. Dado que prolifera multiplicándose por cien en cada generación, un virus puede generar 10.000 millones de virus en solo cinco generaciones. No es de extrañar que un único virus pueda infectar el cuerpo humano, que tiene billones de células sanas, y producirnos un resfriado en más o menos una semana).

No solo ha aumentado la cantidad de potencia de ordenador, sino que ha cambiado radicalmente la forma en que esta potencia se produce, lo cual ha tenido enormes consecuencias en la economía. Podemos ver esta progresión por décadas:

- 1950-1959. Los ordenadores de tubos de vacío eran unos artefactos gigantescos que llenaban varias habitaciones con auténticas junglas de cables, bobinas y acero. Solo el ejército era lo suficientemente rico como para costear aquellas monstruosidades.
- 1960-1969. Los transistores sustituyeron a los ordenadores de tubos de vacío, y los computadores centrales fueron introduciéndose gradualmente en el mercado.
- 1970-1979. Las placas de circuitos integrados, que contenían cientos de transistores, crearon el minicomputador, cuyo tamaño venía a ser el de una mesa grande.
- 1980-1989. Los chips, que contenían decenas de millones de transistores, llegaron a hacer posible la fabricación de unos ordenadores personales que podían caber en un maletín.

- 1990-1999. Internet conectó cientos de millones de ordenadores en una sola red global.
- 2000-2010. El uso omnipresente del ordenador sacó al chip del interior de este aparato, de tal modo que los chips se han diseminado por todo nuestro entorno.

De esta manera, el antiguo paradigma (un único chip dentro de un ordenador de sobremesa o de un portátil) ha sido sustituido por uno nuevo (miles de chips dispersos en el interior de cualquier objeto, como muebles, aparatos, imágenes, paredes, coches y prendas de vestir, todos ellos hablando los unos con los otros y conectados a internet).

Cuando estos chips se insertan en un aparato, este se transforma milagrosamente. Se insertaron en las máquinas de escribir y estas se convirtieron en procesadores de textos. Cuando se insertaron en los teléfonos, estos se convirtieron en móviles. Al insertarlos en las cámaras fotográficas, estas se volvieron cámaras digitales. Las máquinas del millón se convirtieron en videojuegos. Los fonógrafos pasaron a ser iPods. Los aeroplanos se convirtieron en mortales aviones teledirigidos Predator. En cada caso hubo un sector industrial que experimentó una revolución y renació. Finalmente, casi todo lo que nos rodea se volverá inteligente. Los chips serán tan baratos que acabarán costando menos que su envoltura de plástico y sustituirán al código de barras. Las empresas que no hagan que sus productos sean inteligentes pueden encontrarse excluidas de los negocios y sustituidas por aquellas de la competencia que sí lo hagan.

Por supuesto, seguiremos estando rodeados de monitores de ordenador, pero estos se parecerán, más que a los ordenadores, al papel de las paredes, a los marcos de los cuadros o a fotografías familiares. Pensemos en todos los cuadros y las fotografías que decoran hoy en día nuestro hogar; ahora imaginemos que cada uno de ellos está animado, en movimiento y conectado a internet. Al salir, veremos que las imágenes se mueven, ya que las imágenes en movimiento costarán tan poco como las estáticas.

El destino de los ordenadores, al igual que el de otras tecnologías de masas, como la electricidad, el papel y el agua corriente, es volverse invisibles, es decir, desaparecer entre la trama de nuestras vidas para estar en todas partes y en ninguna, haciendo realidad nuestros deseos en silencio y de manera imperceptible.

Hoy en día, cuando entramos en una habitación, buscamos automáticamente el interruptor de la luz, ya que suponemos que hay una instalación eléctrica dentro de las paredes. En el futuro lo primero que haremos al entrar en una habitación será buscar el portal de internet, porque supondremos que la habitación es inteligente. En una ocasión el escritor Max Frisch dijo: «La tecnología [es] un truco para organizar el mundo de tal modo que no tengamos que percibirla[2]».

La ley de Moore también nos permite predecir la evolución de los ordenadores en un futuro cercano. En la próxima década, los chips se combinarán con sensores

supersensibles, de tal modo que estos puedan detectar enfermedades, accidentes y situaciones de emergencia, alertándonos de estos hechos antes de que queden fuera de control. Hasta cierto punto reconocerán la voz y el rostro humanos, y conversarán utilizando un lenguaje formal. Serán capaces de crear unos mundos virtuales completos que por ahora solo podemos ver en sueños. Hacia el año 2020, el precio de un chip podría bajar a más o menos un penique, que es el coste del papel de borrador. Para entonces dispondremos de millones de chips distribuidos por todas partes en nuestro entorno y dispuestos a cumplir nuestras órdenes en silencio.

Finalmente, la propia palabra «ordenador» desaparecerá de nuestro lenguaje.

Con el fin de analizar el avance de la ciencia y la tecnología en el futuro, he dividido cada capítulo en tres períodos: el futuro cercano (desde el presente hasta 2030), mediados de siglo (desde 2030 hasta 2070) y, en última instancia, el futuro lejano (desde 2070 hasta 2100). Estos períodos de tiempo no son más que unas burdas aproximaciones, pero indican el marco temporal de las distintas tendencias que se perfilan en este libro.

El rápido ascenso de la potencia de ordenador para el año 2100 nos dará un poder igual al de los dioses mitológicos que adorábamos en otros tiempos, permitiéndonos controlar el mundo que nos rodea utilizando solo el pensamiento. Al igual que los dioses de la mitología, que podían mover objetos y reconfigurar la vida con un simple movimiento de la mano o una inclinación de cabeza, también nosotros seremos capaces de controlar el mundo que nos rodea con el poder de nuestras mentes. Estaremos en permanente contacto mental con los chips diseminados por nuestro entorno, que cumplirán nuestras órdenes sin rechistar.

Recuerdo haber visto un episodio de *Star Trek* en el que la tripulación de la nave *Enterprise* encontraba un planeta habitado por los dioses griegos. Frente a ellos se erguía altísimo el dios Apolo, una figura gigantesca capaz de deslumbrarles y abrumarles con sus proezas divinas. La ciencia del siglo XXIII era impotente para luchar con un dios que había gobernado los cielos varios milenios atrás en la antigua Grecia. Sin embargo, los tripulantes, una vez que se hubieron recuperado de la sorpresa de encontrarse con los dioses griegos, no tardaron en caer en la cuenta de que tenía que existir sencillamente una fuente de donde procediera aquella potencia, que Apolo tenía que estar en contacto mental con un ordenador central y una planta de energía que serían los encargados de hacer realidad sus deseos. En cuanto la tripulación localizó y destruyó la fuente de energía, Apolo quedó reducido a un simple mortal.

Esto no era más que una historia hollywoodiense. Sin embargo, extrapolando los extraordinarios descubrimientos que ahora mismo se están haciendo en los laboratorios, los científicos pueden imaginar el día en que también nosotros tengamos la posibilidad de aplicar un control telepático a los ordenadores, para procurarnos a nosotros mismos el poder del dios Apolo.

EL FUTURO CERCANO (DESDE EL PRESENTE HASTA 2030)

GAFAS Y LENTES DE CONTACTO CONECTADAS A INTERNET

Hoy en día, a través de internet podemos comunicar nuestros ordenadores y teléfonos móviles. Pero, en el futuro, internet estará omnipresente: en pantallas murales, mobiliario, carteleras e incluso en nuestras gafas y lentes de contacto. Sin más que parpadear, entraremos en línea.

Hay distintas formas de poner internet en una lente. La imagen puede ser emitida por nuestras gafas y enviada a través del cristalino de nuestro ojo hasta la retina. La imagen podría también proyectarse sobre el cristalino, que actuaría como una pantalla. O podría estar incorporada a la montura de las gafas, como una pequeña lupa de joyero. Al mirar por las gafas, veríamos internet como si estuviéramos mirando a una pantalla de cine. Podríamos manipular esto con un instrumento manual que controlara el ordenador mediante una conexión inalámbrica. También podríamos simplemente mover los dedos en el aire para controlar la imagen, ya que el ordenador reconocería la posición de nuestros dedos a medida que los fuéramos moviendo.

Por ejemplo, unos científicos de la Universidad de Washington han trabajado desde 1991 para perfeccionar el monitor virtual de retina (VRD: *virtual retinal display*), un procedimiento en el que se dirige una luz de láser roja, otra verde y otra azul directamente a la retina. Con un campo de visión de 120 grados y una resolución de 1.600 × 1.200 píxeles, la VRD puede producir una imagen brillante y natural, comparable a la que se ve en el cine. Esta imagen se puede generar utilizando un casco, unas gafas similares a las de buceo o unas gafas normales.

En la década de 1990 tuve la oportunidad de probar estas gafas de internet. Se trataba de uno de los primeros prototipos creado por los científicos del MIT Media Lab. Tenían el aspecto de un par de gafas corrientes, salvo por el hecho de que había una lente cilíndrica de poco más de un centímetro de longitud, sujeta al vértice derecho de la misma. Yo podía mirar a través de los cristales sin problema alguno. Pero, dando un golpecito a las gafas, la pequeña lente caía frente a mi ojo. Mirando al interior de la lente, podía ver con claridad toda una pantalla de ordenador, aparentemente solo algo menor que las de tamaño estándar. Me sorprendió la nitidez con que la veía, casi como si la pantalla estuviera ante mi rostro. Entonces tomé un aparato, más o menos del tamaño de un teléfono móvil, que tenía teclado. Pulsando las teclas, podía controlar el movimiento del cursor sobre la pantalla e incluso teclear instrucciones.

En 2010, para un programa especial que presenté en Science Channel, viajé a Fort Benning, Georgia, para examinar lo último de «internet para el campo de batalla» que

tenía el ejército estadounidense, un invento llamado Land Warrior. Me coloqué un casco especial provisto de una pantalla en miniatura sujeta a un lado. Cuando desplacé la pantalla hasta situarla ante mis ojos, pude ver de pronto una imagen impactante: el campo de batalla completo con unas X que marcaban la posición de las tropas propias y enemigas. Ante mi asombro, la «niebla de guerra[*]» se había levantado, y unos sensores GPS localizaban con exactitud las posiciones de todas las tropas, los tanques y los edificios. Pulsando un botón, la imagen cambiaba rápidamente, poniendo a mi disposición internet en el campo de batalla, con informaciones relativas al tiempo y a la disposición de las tropas propias y enemigas, además de estrategias y tácticas.

Una versión mucho más avanzada introduciría internet directamente a través de las lentes de contacto, con un chip y una pantalla LCD insertados en el plástico. Babak A. Parviz y su grupo de la Universidad de Washington en Seattle están trabajando en los fundamentos de las lentes de contacto para ver internet, diseñando unos prototipos que podrán cambiar algún día el modo de acceder a la red.

Parviz prevé que una aplicación inmediata de esta tecnología podría ayudar a los diabéticos a regular sus niveles de glucosa. La lente expondría un informe inmediato de las condiciones que se dieran en el interior de sus cuerpos. Pero esto es solo el principio. En última instancia, Parviz imagina que un día seremos capaces de descargar cualquier película, canción, página web o información desde internet a nuestras lentes de contacto. Tendremos en nuestras lentes un sistema completo de diversiones para disfrutarlas en casa, viendo largometrajes mientras estamos tumbados en el sofá. También podremos utilizar esto para conectarnos directamente con el ordenador de la oficina a través de las lentes y manipular los archivos que aparecen ante nosotros. Mientras gozamos de la playa, podremos mantener una teleconferencia con la oficina sin más que parpadear.

Insertando algún programa de reconocimiento de patrones en las gafas de internet, estas reconocerán objetos e incluso los rostros de algunas personas. Existen ya algunos programas informáticos que pueden reconocer rostros previamente programados con una precisión de más del 90 por ciento. No solo el nombre, sino también la biografía de la persona con la que estamos hablando, puede surgir ante nosotros mientras hablamos. En una reunión esto puede evitar el apuro de no poder recordar el nombre de una persona con la que nos encontramos de repente. Esto puede desempeñar asimismo un papel importante en una fiesta donde estemos con muchos desconocidos entre los que puede haber alguien muy importante, sin que sepamos quién es. En el futuro podremos identificar a los extraños y conocer sus antecedentes, incluso antes de hablar con ellos. (Es algo así como el mundo visto a través de los ojos de un robot en *Terminator*).

Una cosa como esta puede revolucionar el sistema educativo. En el futuro, durante el examen final los estudiantes podrán consultar secretamente internet a través de sus lentes de contacto y buscar así las respuestas a las preguntas, lo cual les

planteará un problema evidente a los profesores que a menudo basan el aprendizaje en la mera memorización. Esto implica que esos profesores tendrán que valorar más la capacidad de pensar y razonar, y no solo la de memorizar.

Nuestras gafas podrán tener también una diminuta cámara de vídeo en la montura, de tal modo que se pueda filmar nuestro entorno y luego enviar las imágenes directamente a internet. Así, en cualquier lugar del mundo, la gente podrá compartir nuestras experiencias en tiempo real. Cualquier cosa que estemos viendo podrá ser vista igualmente por miles de personas. Los padres sabrán qué están haciendo sus hijos. Los enamorados podrán compartir sus experiencias aunque estén separados por la distancia. Los espectadores de un concierto podrán comunicar su emoción a los aficionados de todo el mundo. Los inspectores que visiten fábricas lejanas podrán enviar imágenes en vivo directamente a las lentes de contacto de su jefe. (Además, un cónyuge podrá estar haciendo la compra mientras su pareja le comenta qué hay que comprar).

Parviz ha conseguido ya miniaturizar un chip de tal modo que este se pueda colocar dentro de la película de polímero de una lentilla. Ha logrado colocar un LED (diodo emisor de luz) en el interior de una lente de contacto y ahora está trabajando en una lente que tiene un conjunto de 8 × 8 diodos. Esta lente de contacto puede controlarse mediante una conexión inalámbrica. Parviz dice: «Algún día estos componentes llegarán a contener cientos de LED que formarán frente a nuestros ojos imágenes tales como palabras, gráficos y fotografías. Gran parte del soporte físico es semitransparente, de tal modo que los portadores pueden recorrer su entorno sin chocarse con los objetos ni desorientarse[3]». Su objetivo final, para el que aún faltan años, es crear una lente de contacto de 3.600 píxeles, tales que no tenga cada uno de ellos más de 10 micrómetros de espesor.

Una ventaja de las lentes de contacto con internet es que utilizan una potencia tan reducida (solo unas pocas millonésimas de vatio) que resultan muy eficientes en sus requisitos energéticos y no agotan la batería. Otra ventaja es que el ojo o el nervio óptico son, en cierto modo, una extensión directa del cerebro humano, de tal forma que logramos acceso directo al cerebro sin tener que implantar electrodos. El ojo y el nervio óptico transmiten información a una velocidad superior a la de una conexión de alta velocidad a internet. Por consiguiente, una lente de contacto con internet ofrece quizá el acceso más eficiente y rápido al cerebro.

Mostrar una imagen en el ojo mediante una lente de contacto es un poco más complicado que hacerlo con las gafas de internet. Un LED puede producir un punto de luz, o píxel, pero hay que añadir una microlente para que la luz converja directamente en la retina. La imagen final flotaría aparentemente a unos 60 centímetros de nuestros ojos. Parviz está considerando también un diseño más avanzado, consistente en la utilización de microláseres para enviar una imagen de extraordinaria nitidez directamente a la retina. Con la misma tecnología que se usa en la fabricación de chips para labrar diminutos transistores, se puede también grabar

láseres diminutos del mismo tamaño, haciendo así los láseres más pequeños del mundo. Utilizando esta tecnología es posible, en principio, fabricar láseres de unos 100 átomos de diámetro. Al igual que se hace con los transistores, se puede pensar en la posibilidad de meter millones de láseres en un chip del tamaño de una uña.

UN COCHE SIN CONDUCTOR

En un futuro cercano, también podremos navegar seguros por la red mediante nuestras lentes de contacto mientras conducimos un coche. Viajar hasta el lugar de trabajo no será una tarea tan penosa, porque los coches se conducirán solos. Ya existen coches sin conductor que utilizan el GPS para fijar su posición con un error máximo de menos de un metro y pueden rodar cientos de kilómetros. La Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa (DARPA), subvencionada por el Pentágono, patrocinó una competición llamada DARPA Grand Challenge en la que se invitaba a los laboratorios a presentar modelos de coches sin conductor para participar en una carrera a través del desierto de Mojave y se ofrecía un premio de un millón de dólares. La DARPA seguía así su larga tradición de financiar tecnologías arriesgadas y quiméricas.

(Algunos proyectos del Pentágono incluyen internet, que fue diseñado originalmente para que los científicos y los funcionarios pudieran conectarse durante y después de una guerra atómica, y el sistema GPS, que fue diseñado, en principio, para guiar los misiles ICBM. Pero, tanto internet como el GPS fueron desclasificados y puestos al servicio del gran público tras el final de la guerra fría).

En 2004, la competición tuvo un comienzo embarazoso porque ni un solo vehículo sin conductor fue capaz de recorrer los aproximadamente 240 kilómetros de terreno accidentado y cruzar la línea de meta. Todos aquellos coches robot se averiaron o se perdieron. Sin embargo, un año después cinco coches terminaron una carrera aún más difícil. Tuvieron que conducir por carreteras que tenían cien curvas cerradas, tres túneles estrechos y tramos con rampas a cada lado.

Algunas voces críticas dijeron que los coches robot podrían circular por el desierto, pero nunca entre el tráfico del centro de una ciudad. Entonces, en 2007, la DARPA patrocinó un proyecto aún más ambicioso: el Urban Challenge, en el que los coches robot tendrían que realizar una penosa carrera de casi 100 kilómetros a través de una simulación de territorio urbano en menos de seis horas. Los coches tenían que respetar todas las leyes de tráfico, evitar a otros coches robot durante la carrera y negociar el paso por los cruces. Seis equipos realizaron todo el recorrido del Urban Challenge, y los tres equipos ganadores se llevaron dos millones, un millón y medio millón de dólares, respectivamente.

El objetivo del Pentágono es conseguir que en 2015 un tercio de las tropas de tierra de Estados Unidos sean autónomas. Esta tecnología podría salvar vidas, ya que

recientemente la mayoría de las bajas se han producido por la explosión de bombas colocadas junto a las carreteras. En el futuro muchos vehículos militares estadounidenses circularán sin conductor. Pero, para los ciudadanos en general, se trataría de coches que se conducen solos, sin más que pulsar un botón, con lo cual el conductor podría viajar trabajando, descansando, admirando el paisaje, viendo una película o navegando en internet.

Tuve ocasión de conducir yo mismo uno de esos coches para un programa especial de televisión de Discovery Channel. Se trataba de un elegante coche deportivo, modificado por los ingenieros de la Universidad del Estado de Carolina del Norte con el fin de que fuera totalmente autónomo. Sus ordenadores tenían la potencia de ocho ordenadores personales. Me resultó un poco problemático subir al coche, porque su interior estaba lleno. Por todas partes se podía ver gran cantidad de componentes electrónicos sofisticados, que se encontraban apilados sobre los asientos y el salpicadero. Cuando agarré el volante, observé que este tenía un cable especial de goma conectado a un pequeño motor. Un ordenador que controlaba a este motor podía hacer que el volante girara.

Después de girar la llave, pisar el acelerador y dirigir el coche a la autopista, accioné un interruptor para que el ordenador tomara el control del vehículo. Retiré mis manos del volante, y el coche se conducía por sí solo. Yo tenía plena confianza en el coche, cuyo ordenador hacía constantemente pequeños ajustes a través del cable de goma que estaba conectado al volante. Al principio se me hizo un poco extraño ver que el volante y el pedal del acelerador se movían solos. Parecía como si un conductor invisible y fantasmal se hubiera hecho cargo del vehículo, pero, después de un rato, me acostumbré a la situación. De hecho, un poco más tarde me pareció un placer poder descansar en un coche que se conducía él solo con una precisión y una habilidad sobrehumanas. Me recosté en el asiento y disfruté del paseo.

El corazón del coche sin conductor era el sistema GPS, que permitía al ordenador localizar la posición del vehículo salvo un error máximo de menos de un metro. (En ocasiones oí decir a los ingenieros que el GPS podía determinar la posición del coche salvo un error máximo de entre 5 y 10 centímetros). El propio sistema GPS es en sí mismo una maravilla de la tecnología moderna. Cada uno de los treinta y dos satélites del GPS que orbitan alrededor de la Tierra emite una onda de radio específica que es captada por los receptores de GPS situados en mi coche. La señal procedente de cada satélite sufre una ligera distorsión porque los satélites se desplazan siguiendo órbitas ligeramente diferentes. Esta distorsión se llama variación de la frecuencia por el efecto Doppler o, sencillamente, deslizamiento Doppler. (Las ondas de radio, por ejemplo, se comprimen si el satélite se está moviendo hacia mí y se estiran si el satélite se está alejando de mí). Analizando la ligera distorsión de las frecuencias de tres o cuatro satélites, el ordenador del coche podría determinar mi posición con exactitud.

El vehículo lleva también radar en sus parachoques, con el fin de detectar posibles obstáculos. Esto será crucial en el futuro, ya que cada coche adoptará automáticamente medidas de emergencia en cuanto detecte la inminencia de un accidente. Hoy en día, casi 40.000 personas mueren al año por accidentes de tráfico en Estados Unidos. En el futuro, la expresión «accidente de tráfico» irá desapareciendo gradualmente de nuestro idioma.

Es posible que también los embotellamientos se conviertan en cosa del pasado. Un ordenador central podrá seguir todos los movimientos de cada vehículo que circule por la carretera, sin más que estar comunicado con todos los vehículos sin conductor. De esta manera detectará fácilmente los posibles embudos y retenciones del tráfico en las autopistas. En un experimento llevado a cabo en la Interestatal 15, al norte de San Diego, se procedió a colocar chips en la carretera, de tal modo que un ordenador central tomara el control de los vehículos que circulaban. En caso de embotellamiento, el ordenador sustituiría al conductor y conseguiría que el tráfico fluyera sin problemas.

El coche del futuro también será capaz de detectar otros peligros. Miles de personas han resultado muertas o heridas en accidentes de tráfico porque el conductor se ha dormido, especialmente por la noche o en viajes largos y monótonos. Los ordenadores actuales pueden enfocarnos los ojos y reconocer las señales reveladoras de que estamos cayendo en el sueño. En este caso, el ordenador está programado para emitir un sonido que nos despierte. Si esto falla, el ordenador asumirá la conducción del vehículo. Los ordenadores pueden también reconocer la presencia de cantidades excesivas de alcohol en el interior del coche, lo cual puede reducir los miles de víctimas que se producen cada año por causa de la bebida.

La transición a los coches inteligentes no tendrá lugar de manera inmediata. Primero, el ejército hará un despliegue de vehículos de este tipo y, sobre la marcha, detectará los posibles fallos. A continuación, los coches robot saldrán al mercado y aparecerán inicialmente en los tramos largos y aburridos de las autopistas interestatales. Posteriormente, harán acto de presencia en suburbios y grandes ciudades, pero el conductor tendrá siempre la posibilidad de anular la actividad del ordenador y sustituirlo en caso de emergencia. Finalmente, nos preguntaremos cómo pudimos en otros tiempos vivir sin estos coches.

CUATRO PANTALLAS MURALES

Los ordenadores no solo aliviarán el cansancio de los desplazamientos y reducirán el número de accidentes de tráfico, sino que también nos ayudarán a contactar con nuestros amigos y conocidos. En el pasado algunas personas se quejaban de que la revolución informática nos había deshumanizado y aislado. Pero, en realidad, lo que ha hecho es permitir que nuestro círculo de amigos y conocidos se expanda

exponencialmente. Si uno de nosotros se siente solo o necesitado de compañía, basta con pedir a la pantalla mural que organice una partida de bridge con otros individuos solitarios de cualquier parte del mundo. Si necesitamos ayuda para planificar las vacaciones, organizar un viaje o encontrar un ligue, lo haremos mediante nuestra pantalla mural.

En el futuro todo empezará con un rostro amable que aparecerá en nuestra pantalla mural (un rostro que podremos modificar según nuestros gustos). Le pediremos que nos planifique unas vacaciones. El rostro conocerá de antemano nuestras preferencias y hará una búsqueda en internet para ofrecernos una lista de las mejores opciones posibles a los mejores precios.

Las reuniones familiares también podrán realizarse mediante la pantalla mural. Las cuatro paredes de nuestra sala de estar tendrán pantallas, por lo que podremos estar rodeados de nuestros parientes, aunque estos vivan muy lejos. Quizá suceda que un familiar no pueda acudir para una ocasión importante. Sin embargo, la familia puede reunirse en torno a la pantalla mural y celebrar una reunión que será en parte real y en parte virtual. O bien, mediante las lentes de contacto, podremos ver las imágenes de todos nuestros seres queridos como si realmente estuvieran presentes, aunque se encuentren a miles de kilómetros de distancia. (Algunos comentaristas han señalado que internet fue concebido inicialmente por el Pentágono como un artilugio «masculino», porque estaba relacionado con dominar a un enemigo durante una confrontación bélica. Sin embargo, internet es ahora mayormente «femenino», porque se trata de ir hacia alguien y entrar en contacto con él).

La teleconferencia será sustituida por la telepresencia: la persona aparecerá en imagen tridimensional completa y con sonido en nuestras gafas o lentes de contacto. Por ejemplo, en una reunión todo el mundo se sentará alrededor de una mesa, salvo algunos participantes que solo aparecerán en nuestras lentes. Sin las lentes veríamos que algunos asientos están vacíos. Con las lentes veremos la imagen de todos sentados en sus sillas como si estuvieran presentes. (Esto significa que una cámara especial grabará a todos los participantes sentados alrededor de una mesa similar, y luego se enviarán sus imágenes a través de internet).

Cuando se estrenó la película *La guerra de las galaxias*, los espectadores se sorprendieron al ver imágenes tridimensionales de personas que aparecían por el aire. Pero, en el futuro, utilizando la tecnología informática podremos ver estas imágenes tridimensionales en nuestras lentes de contacto, gafas o pantallas murales.

Al principio, podría parecer extraño hablar a una habitación vacía. Sin embargo, tenemos que recordar que, cuando empezó el teléfono, algunos lo criticaban diciendo que la gente hablaba a unas voces incorpóreas. Se lamentaban de que el invento sustituiría gradualmente el contacto personal. Aquellas voces críticas tenían razón, pero actualmente no nos importa hablar con voces incorpóreas, porque eso ha hecho que crezca nuestro círculo de contactos y ha enriquecido nuestras vidas.

Esta nueva tecnología puede cambiar también nuestra vida amorosa. Si nos sentimos solos, la pantalla mural sabrá cuáles han sido nuestras preferencias en el pasado, así como las características físicas y sociales que deseamos en un novio o una novia, y hará un barrido en internet para encontrarnos una posible pareja. Además, dado que la gente a veces miente al describir su perfil, nuestra pantalla, como medida de seguridad, revisará automáticamente el historial de cada persona para detectar posibles falsedades en su biografía.

PAPEL ELECTRÓNICO FLEXIBLE

El precio de los televisores de pantalla plana, que en otro tiempo superaba los 10.000 dólares, se ha reducido a una quincuagésima parte en solo una década. En el futuro, las pantallas planas que cubren la totalidad de una pared también se abaratarán de una manera drástica. Las pantallas murales serán flexibles y extremadamente delgadas, y utilizarán OLED (diodos orgánicos de emisión de luz). Estos son similares a los diodos emisores de luz corrientes (LED), pero con la diferencia de estar basados en componentes orgánicos que pueden disponerse en un polímero y hacerlo flexible. Cada píxel de la pantalla flexible está conectado a un transistor que controla el color y la intensidad de la luz.

Los científicos del Flexible Display Center de la Universidad de Arizona ya están trabajando con Hewlett-Packard y el ejército estadounidense para perfeccionar esta tecnología. Después, las fuerzas del mercado abaratarán el coste de esta tecnología y la acercarán al gran público. A medida que los precios bajen, el coste de estas pantallas murales podrá aproximarse finalmente al precio de un papel de empapelar corriente. Por lo tanto, en el futuro, cuando haya que empapelar las paredes, podrán colocarse también las pantallas murales al mismo tiempo. Cuando deseemos cambiar el dibujo del papel de las paredes, bastará con pulsar una tecla. Redecorar será así de fácil.

Esta tecnología de pantallas flexibles también hace posible que las pantallas de los ordenadores personales sean totalmente transparentes. En un futuro cercano podremos estar mirando a través de una ventana y, con solo mover las manos, esta se convertirá de repente en la pantalla del ordenador personal. O en cualquier imagen que deseemos ver. Podremos estar mirando a través de una ventana que se encuentre a miles de kilómetros de distancia.

Hoy en día utilizamos papel de borrador para garabatear algo, y luego lo tiramos a la basura. En el futuro tendremos «ordenadores de borrador» que no tendrán una identidad especial por sí mismos. Garabatearemos en ellos para luego desecharlos. Actualmente organizamos nuestro escritorio y el resto de los muebles en torno al ordenador, que preside nuestro despacho. En el futuro, el ordenador de sobremesa podría desaparecer, y los archivos se moverían con nosotros al tiempo que nos

desplazáramos de un lugar a otro, de una habitación a otra, o desde el despacho a casa. Esto nos ofrecerá la posibilidad de disponer de información continuada, en cualquier momento y lugar. Hoy en día vemos en los aeropuertos a cientos de viajeros que llevan consigo sus ordenadores portátiles. Cuando llegan al hotel, tienen que conectarse a internet y, cuando regresan a su casa, han de descargar los archivos en sus ordenadores de sobremesa. En el futuro, nunca tendremos necesidad de cargar con un ordenador, ya que allí donde vayamos las paredes, los cuadros y el mobiliario podrán conectarnos a internet, incluso cuando estemos en un tren o en un coche. (Un precursor de esto es la «informática en nube», o *cloud computing*, donde nos cobran por el tiempo de uso, no por los ordenadores, facturando la informática como un servicio que se mide del mismo modo que el consumo de agua o de electricidad).

MUNDOS VIRTUALES

El objetivo de la informática omnipresente es introducir el ordenador en nuestro mundo: poner chips por todas partes. El objetivo de la realidad virtual es lo contrario: ponernos a nosotros mismos dentro del mundo del ordenador. La realidad virtual fue introducida por primera vez por los militares en la década de 1960 como un modo de entrenar pilotos y soldados utilizando simulaciones. Los pilotos podían practicar el aterrizaje sobre la cubierta de un portaaviones tan solo mirando una pantalla de ordenador y moviendo una palanca de mando. En caso de guerra atómica, los generales y los líderes políticos, aunque se encuentren en lugares muy distantes, podrán celebrar reuniones secretas en el ciberespacio.

Hoy en día, en una época en que la potencia de ordenador se expande exponencialmente, es posible vivir en un mundo simulado donde usted puede controlar un avatar (una reencarnación o imagen animada que le representa a usted). Puede encontrarse con otros avatares, explorar mundos imaginarios e incluso enamorarse y casarse. También puede comprar artículos virtuales con dinero virtual. Uno de los sitios más populares, Second Life, registró 16 millones de cuentas en 2009. Aquel año, algunas personas ganaron más de un millón de dólares utilizando Second Life. (Ahora bien, ese beneficio está sujeto a impuestos en Estados Unidos, porque el gobierno lo considera como ingresos reales).

La realidad virtual es ya un ingrediente básico de los videojuegos. En el futuro, a medida que la potencia de ordenador continúe en expansión, podremos también visitar mundos irreales mediante nuestras gafas o en la pantalla mural. Por ejemplo, si queremos ir de compras o visitar un lugar exótico, podríamos hacerlo primero a través de la realidad virtual, navegando por la pantalla del ordenador como si estuviéramos realmente allí. De esta manera, podremos caminar por la Luna, pasar unas vacaciones en Marte, hacer compras en países lejanos, visitar cualquier museo y decidir nosotros mismos adónde queremos ir.

Hasta cierto punto, también podremos sentir y tocar objetos de este cibermundo. Esto se llama «tecnología háptica» y nos permite percibir la presencia de objetos generados por el ordenador. Los primeros en desarrollar esta tecnología fueron científicos que tenían que manejar materiales altamente radiactivos mediante brazos robóticos accionados por control remoto, y también militares que querían que sus pilotos sintieran la resistencia de la palanca de mando en un simulador de vuelos.

Para reproducir la sensación del tacto, los científicos han creado un dispositivo conectado a muelles y engranajes, de tal modo que al empujar con los dedos hacia delante sobre el dispositivo, este empuja hacia atrás, simulando una sensación de presión. Por ejemplo, cuando pasamos los dedos por una mesa, este dispositivo puede simular la sensación de percibir su dura superficie de madera. De este modo, podemos sentir la presencia de objetos que se ven en las gafas de realidad virtual, completando así la ilusión de estar en otro lugar.

Para crear la sensación de textura, hay otro aparato que hace posible que nuestros dedos recorran una superficie que contiene miles de diminutos alfileres. Mientras los dedos se mueven, un ordenador regula la altura de cada alfiler, de manera que se pueda simular la textura de superficies duras, ropa de terciopelo o papel de lija. En el futuro, colocándonos unos guantes especiales, podremos tener la sensación real de tocar toda una variedad de objetos y superficies virtuales.

Esto será esencial para formar cirujanos, ya que un cirujano tiene que poder sentir presión cuando realiza una operación delicada, y el paciente sería una imagen holográfica tridimensional. Esto también nos hace estar un poco más cerca de la holocubierta[*] que aparece en la serie *Star Trek*, donde los protagonistas recorren un mundo virtual y pueden tocar objetos virtuales. Mientras nos movemos por una habitación vacía, podemos ver objetos fantásticos en nuestras gafas o lentes de contacto. Cuando alargamos la mano para tocarlos, un dispositivo háptico se alza del suelo y simula el objeto que estamos tocando.

Tuve la oportunidad de observar directamente estas tecnologías cuando visité el CAVE (*cave automatic virtual environment*: entorno automático de realidad virtual) en la Universidad de Rowan, en New Jersey, para el Science Channel. Entré en una habitación vacía donde me encontraba rodeado por cuatro paredes, cada una de las cuales estaba iluminada por un proyector. Sobre las paredes podían proyectarse imágenes en tres dimensiones, lo cual producía la ilusión de ser transportado a otro mundo. En una de las demostraciones me vi rodeado por dinosaurios gigantescos y feroces. Moviendo una palanca de mando pude cabalgar a lomos de un *Tyrannosaurus rex*, e incluso entrar directamente en su boca. Más tarde visité el Aberdeen Proving Ground en Maryland, donde los militares estadounidenses han realizado una holocubierta en su versión más avanzada. Me colocaron sensores en un casco y una mochila, de tal modo que el ordenador conocía con exactitud la posición de mi cuerpo. Entonces empecé a caminar por una máquina de andar estática que, en este caso, era omnidireccional, es decir, una sofisticada máquina que permitía andar

en cualquier dirección, pero permaneciendo siempre en el mismo lugar. De repente me encontraba en un campo de batalla, esquivando las balas que me disparaban unos francotiradores enemigos. Podía correr en cualquier dirección, esconderme en cualquier callejón, bajar a toda velocidad por cualquier calle, y las imágenes tridimensionales de la pantalla cambiaban al instante. Incluso podía tumbarme en el suelo, y las pantallas cambiaban en concordancia con mi nueva posición. Pude imaginar que en el futuro seremos capaces de experimentar una inmersión total, por ejemplo, entablar combates aéreos con naves espaciales extraterrestres, huir de monstruos furiosos y destructivos, o retozar en una isla desierta, todo ello desde la comodidad de nuestras salas de estar.

LA ATENCIÓN MÉDICA EN UN FUTURO CERCANO

La visita a la consulta de un médico cambiará por completo. Durante una revisión rutinaria, cuando hablemos con el «doctor», este será probablemente un programa informático robótico que aparecerá en nuestra pantalla mural y podrá diagnosticar correctamente hasta un 95 por ciento de las enfermedades comunes. El «doctor» podrá tener aspecto de persona, pero en realidad será una imagen animada programada para formular ciertas preguntas sencillas. Este «doctor» dispondrá también de un mapa completo de los genes del paciente y recomendará un tratamiento médico que tendrá en cuenta todos los factores genéticos de riesgo del enfermo.

Para diagnosticar el problema, el «doctor» nos pedirá que nos sometamos a una sencilla exploración corporal. En la original serie *Star Trek*, el público se asombraba al ver un aparato llamado *tricorder*[*] que podía diagnosticar al instante cualquier enfermedad y mirar en el interior del cuerpo. Pero no hace falta esperar hasta el siglo XXIII para ver este aparato futurista. Los equipos de imagen por resonancia magnética (RM), que pesan varias toneladas y ocupan toda una habitación, se han reducido ya a unos treinta centímetros y llegarán a ser tan pequeños como un teléfono móvil. Pasando un aparato de estos sobre nuestro cuerpo podremos ver el interior de nuestros órganos. Los ordenadores procesarán estas imágenes tridimensionales y nos darán un diagnóstico. Esta exploración podrá determinar en cuestión de minutos la presencia de una amplia variedad de enfermedades, incluido el cáncer, años antes de que se forme un tumor. En la exploración intervendrán los chips con moléculas de ADN, unos chips de silicio provistos de millones de sensores diminutos que pueden detectar la presencia del ADN revelador de muchas enfermedades.

Está claro que mucha gente odia ir al médico. Sin embargo, en el futuro nuestro estado de salud será monitorizado en silencio y sin molestia alguna varias veces al día, sin que nos demos cuenta. Nuestro tocador, el espejo del baño y nuestras ropas tendrán chips de ADN para determinar silenciosamente si tenemos colonias

cancerosas de solo unos pocos cientos de células que están creciendo dentro de nuestro organismo. En nuestro cuarto de baño y nuestras ropas tendremos escondidos más sensores que los que hay actualmente en un hospital moderno o en una universidad. Por ejemplo, al soplar en un espejo, se puede detectar el ADN de una proteína mutada llamada p53, que está implicada en el 50 por ciento de los cánceres más comunes. Esto significa que la palabra «tumor» irá desapareciendo gradualmente de nuestro idioma.

Hoy en día, si somos víctimas de un grave accidente de tráfico en una carretera solitaria, podemos morir desangrados. Pero, en el futuro, nuestras ropas y nuestro coche se pondrán automáticamente en acción a la primera señal de trauma y llamarán a una ambulancia, determinarán la posición del coche y descargarán todo nuestro historial médico. Y todo eso aunque el interesado esté inconsciente. En el futuro será difícil morir en soledad. La ropa podrá percibir cualquier irregularidad del pulso cardíaco, de la respiración e incluso de las ondas cerebrales mediante chips diminutos ocultos en el tejido. En el futuro, nada más vestirnos, estaremos ya en línea.

Actualmente es posible poner un chip en el interior de una píldora del tamaño de una aspirina, y completar esto con una cámara de televisión y un transmisor. Cuando la tragamos, esta «píldora inteligente» toma imágenes de televisión de nuestro esófago y nuestros intestinos, y luego radia la señal a un receptor cercano. (Esto da un nuevo significado a la expresión *Intel inside*). De esta manera, los médicos pueden captar imágenes de los intestinos del paciente y detectar tumores cancerosos sin tener que realizar una colonoscopia (que presenta el inconveniente de tener que introducir un tubo de casi dos metros por el intestino grueso). Los aparatos microscópicos de este tipo también reducirán gradualmente la necesidad de cortar la piel para realizar operaciones quirúrgicas.

Esto es solo una muestra del modo en que la revolución informática influirá en la sanidad. Hablaré más detalladamente sobre la revolución en la medicina en los capítulos 3 y 4, donde también mencionaré la terapia génica, la clonación y los cambios en la duración de la vida humana.

VIVIR EN UN CUENTO DE HADAS

Dado que la inteligencia informática será tan barata y estará ampliamente difundida en nuestro entorno, algunos futurólogos han comentado que el futuro podría parecer algo sacado de un cuento de hadas. Si llegamos a tener el poder de los dioses, el cielo en el que viviremos será como un mundo de fantasía. El futuro de internet, por ejemplo, es convertirse en el espejo de Blancanieves. Le diremos «Espejito, espejito», y emergerá un rostro amable que nos facilitará el acceso a la sabiduría de todo el planeta. Colocaremos chips en nuestros juguetes y así los convertiremos en seres inteligentes, como Pinocho, el muñeco que quería ser un muchacho real. Al igual que

Pocahontas, les hablaremos al viento y a los árboles, y ellos nos responderán. Asumiremos que los objetos son inteligentes y que podemos hablar con ellos.

Puesto que los ordenadores serán capaces de localizar muchos de los genes que controlan el proceso de envejecimiento, podríamos ser eternamente jóvenes, como Peter Pan. Conseguiremos que el envejecimiento avance más despacio, y quizá podamos invertir este proceso, como los chicos del País de Nunca Jamás, que no querían crecer. La realidad ampliada nos hará vivir la ilusión de que, como Cenicienta, podemos acudir a unos bailes fantásticos en una carroza real y bailar airosamente con un bello príncipe. (Pero a medianoche nuestras gafas de realidad ampliada se apagarán y regresaremos al mundo real). Dado que los ordenadores están descubriendo cuáles son los genes que controlan nuestros cuerpos, podremos reformar la ingeniería de estos, recolocando órganos y cambiando nuestro aspecto, incluso a nivel genético, como el monstruo de *La bella y la bestia*.

Algunos futurólogos han llegado a temer que esto podría ocasionar un retorno al misticismo de la Edad Media, una época en la que la mayoría de la gente creía en la existencia de espíritus invisibles que habitaban todas las cosas de su entorno.

MEDIADOS DE SIGLO (DESDE 2030 HASTA 2070)

EL FINAL DE LA LEY DE MOORE

Hemos de plantearnos la siguiente pregunta: ¿Cuánto puede durar esta revolución informática? Si la ley de Moore sigue cumpliéndose durante cincuenta años más, es concebible que los ordenadores superen rápidamente la potencia del cerebro humano. A mediados de siglo se producirá una nueva dinámica. Como dijo George Harrison en una ocasión: «Todas las cosas tienen un final». Incluso la ley de Moore debe acabarse y, con ella, el ascenso espectacular de la potencia de ordenador, que ha alimentado el crecimiento económico durante el último medio siglo.

Actualmente consideramos normal y, en realidad, creemos que es nuestro derecho natural, tener productos informáticos de una potencia y una complejidad que no dejan de crecer. Esta es la razón por la que cada año compramos nuevos productos informáticos, sabiendo que casi duplican la potencia del modelo del año pasado. Pero, si la ley de Moore se viene abajo, y cualquier generación de productos informáticos tiene aproximadamente la misma potencia y velocidad que la generación anterior, ¿por qué molestarnos en comprar nuevos ordenadores?

Puesto que los chips están presentes en una amplia variedad de productos, esto podría tener un efecto desastroso en todos los sectores de la economía. Al quedarse

totalmente paradas un montón de industrias, millones de personas podrían perder sus empleos, y la economía sufriría un grave revés.

Hace años, cuando los físicos señalábamos el inevitable desplome de la ley de Moore, la industria seguía la tradición de despreciar nuestras observaciones, alegando que éramos lobos aullando. Dijeron que se había predicho tantas veces el final de la ley de Moore que simplemente ya no se lo creían.

Pero las cosas han cambiado.

Hace dos años inauguré una importante conferencia para Microsoft en su sede central de Seattle, Washington. Entre los asistentes había tres mil de los ingenieros de mayor nivel de Microsoft, que esperaban oír lo que yo tenía que decirles sobre el futuro de los ordenadores y las telecomunicaciones. Al mirar aquella enorme multitud, pude ver los rostros de los jóvenes y entusiastas ingenieros que estarían creando los programas que funcionarán en nuestros ordenadores de sobremesa o portátiles. Hablé con franqueza sobre la ley de Moore y dije que la industria ha de prepararse para su desplome. Una década antes habrían recibido mi predicción con carcajadas o, al menos, con algunas risitas disimuladas. Pero esta vez solo vi gente que asentía con la cabeza.

El desplome de la ley de Moore es un asunto de importancia internacional, y hay billones de dólares en juego. Sin embargo, el modo exacto en que acabará, y qué la sustituirá, son cuestiones que dependen de las leyes de la física. Las respuestas a estos interrogantes harán temblar la estructura económica del capitalismo.

Para comprender esta situación es importante darse cuenta de que el notable éxito de la revolución informática se basa en varios principios de la física. En primer lugar, los ordenadores tienen una velocidad asombrosa porque las señales eléctricas se desplazan casi a la velocidad de la luz, que es la mayor velocidad posible en todo el universo. En un segundo un rayo de luz puede dar siete veces la vuelta al mundo o llegar a la Luna. También los electrones se mueven con facilidad y están unidos al átomo con muy poca fuerza (pueden desprenderse simplemente cuando nos peinamos el pelo, caminamos por una alfombra o lavamos la colada; esta es la razón por la que tenemos electricidad estática). La combinación de electrones débilmente unidos y su enorme velocidad nos permite enviar señales eléctricas a una velocidad asombrosa, que dio lugar a la revolución eléctrica del siglo pasado.

En segundo lugar, la cantidad de información que se puede introducir en un rayo láser prácticamente no tiene límite. Las ondas luminosas, dado que vibran mucho más rápido que las ondas sonoras, pueden transportar una cantidad de información mucho mayor que la que puede llevar el sonido. (Por ejemplo, imagínese que estira un trozo largo de cuerda y luego hace que un extremo vibre rápidamente. Cuanto más rápido sacuda ese extremo, más señales podrá enviar por la cuerda. Por consiguiente, la cantidad de información que se puede introducir en una onda aumenta cuando la vibración es más rápida, es decir, aumentando su frecuencia). La luz es una onda que vibra a aproximadamente 10^{14} ciclos por segundo (o sea, la unidad seguida de catorce

ceros). Hacen falta muchos ciclos para transmitir un bit de información (un 1 o un 0). Esto significa que un cable de fibra óptica puede transportar más o menos 10^{11} bits de información en una sola frecuencia. Y este número puede incrementarse introduciendo muchas señales en una sola fibra óptica y reuniendo luego estas fibras en un cable. Esto quiere decir que, aumentando el número de canales que hay en un cable, y aumentando luego el número de cables, se puede transmitir una cantidad casi ilimitada de información.

En tercer lugar, y esto es lo más importante, la revolución informática recibe su impulso de la miniaturización de los transistores. Un transistor es una puerta, o un interruptor, que controla el flujo de electricidad. Si se compara un circuito eléctrico con una instalación de fontanería, entonces un transistor es como un grifo o una llave que controla el flujo del agua. Del mismo modo que un simple giro de la llave puede controlar un enorme flujo de agua, así también el transistor permite que un flujo muy pequeño de electricidad controle un flujo mucho mayor, ampliando así su potencia.

En la base de esta revolución se sitúa el chip informático, que puede contener cientos de millones de transistores en una oblea de silicio del tamaño de la uña de un dedo. Dentro de cualquier ordenador portátil hay un chip cuyos transistores solo pueden verse mediante un microscopio. Estos transistores tan increíblemente pequeños se crean del mismo modo que se hacen los diseños sobre una camiseta.

Los diseños que ilustran las camisetas se producen en serie creando primero una plantilla con el dibujo del patrón que se desea realizar. Luego se coloca la plantilla sobre la tela y se aplica pintura con un espray. Solo donde están los orificios de la plantilla pasará la pintura a la tela. Luego se retira la plantilla, y queda en la camiseta una copia perfecta del dibujo.

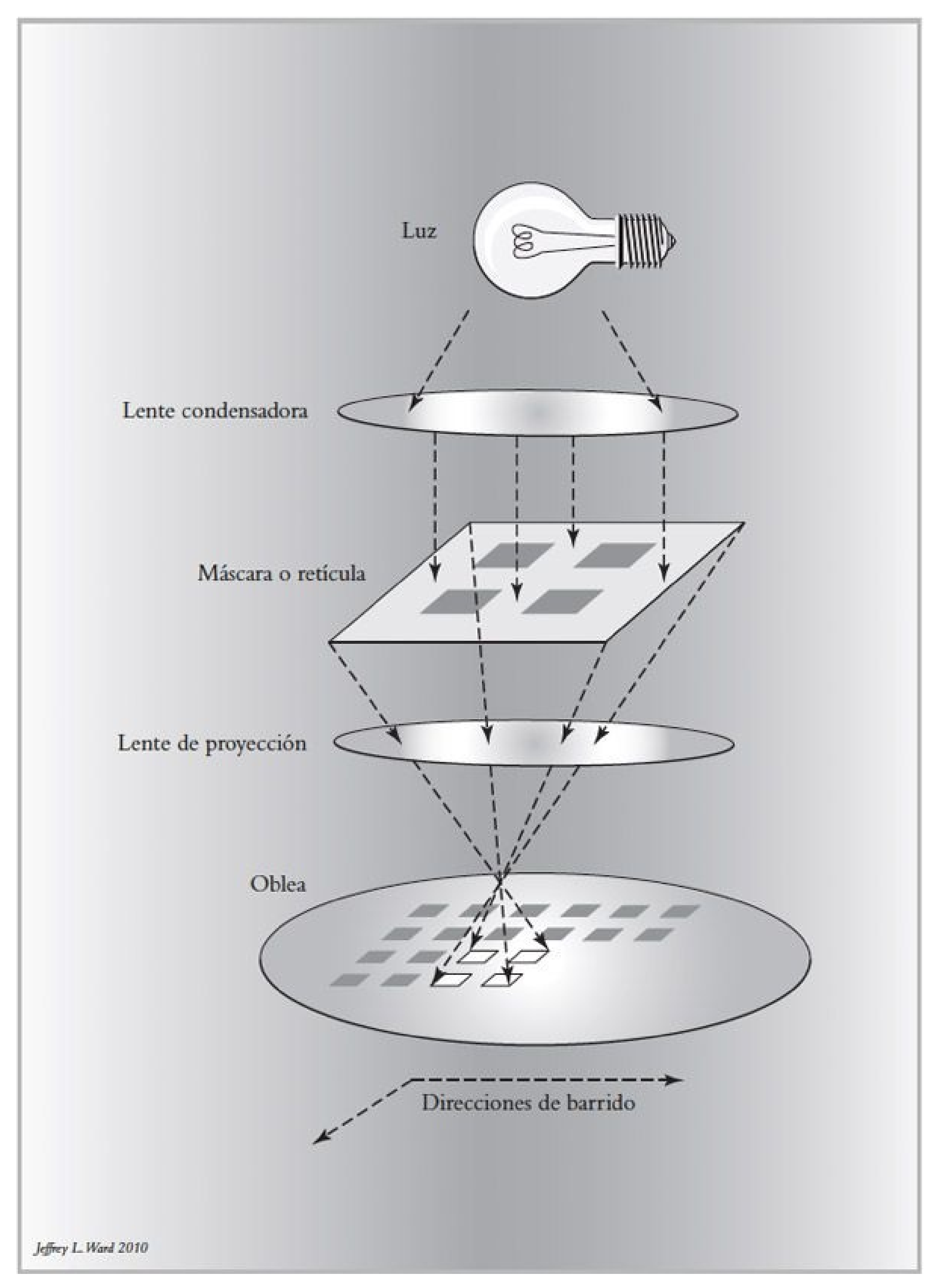
De manera similar, se crea primero una plantilla que contiene los intrincados dibujos de millones de transistores. Esta se coloca sobre una oblea que contiene muchas capas de silicio, un material que es sensible a la luz. Entonces se proyecta una luz ultravioleta sobre la plantilla, y esta luz penetra a través de los orificios, incidiendo sobre la oblea de silicio.

A continuación, la oblea se baña en un ácido que esculpe los esbozos de los circuitos y se crea el intrincado diseño de millones de transistores. Dado que la oblea está formada por muchas capas conductoras y semiconductoras, el ácido corta hacia el interior de la oblea a diferentes profundidades y con distintos patrones, de modo que pueden crearse circuitos de una complejidad enorme.

Una razón por la que la ley de Moore ha incrementado incesantemente la potencia de los chips es que la luz ultravioleta puede ajustarse para que su longitud de onda sea cada vez menor, con lo que es posible esculpir transistores cada vez más diminutos en las obleas de silicio. Puesto que la luz ultravioleta tiene una longitud de onda que puede reducirse hasta los 10 nanómetros (el nanómetro es una milmillonésima de metro), el transistor más pequeño que puede esculpirse tiene un diámetro de unos treinta átomos.

Pero este proceso no puede continuar de manera indefinida. En algún momento será físicamente imposible esculpir de esta manera unos transistores que sean del tamaño de los átomos. Incluso podemos calcular aproximadamente cuándo llegará por fin a desplomarse la ley de Moore: cuando consigamos transistores del tamaño de los átomos.

Alrededor de 2020, o poco después, la ley de Moore dejará gradualmente de ser válida, y es posible que Silicon Valley se convierta poco a poco en un simple cinturón industrial, salvo que se encuentre una tecnología sustitutiva. Según las leyes de la física, la era del silicio llegará a su fin a medida que entremos en la era postsilicio. Los transistores serán tan pequeños que la teoría cuántica o la física atómica tomarán el relevo, y los electrones se escaparán de los cables. Por ejemplo, la capa más fina que contiene cualquier ordenador tendrá un espesor de unos cinco átomos. En ese punto, según las leyes de la física, la teoría cuántica toma el relevo. El principio de incertidumbre de Heisenberg afirma que no es posible conocer a la vez la posición y la velocidad de una partícula. Puede parecer que esto contradice lo que diría la intuición, pero a nivel de los átomos es simplemente imposible saber dónde está el electrón, por lo que este nunca puede estar confinado con precisión en una capa o un cable ultrafinos, y necesariamente ha de escaparse, causando un cortocircuito en el circuito.



El final de la ley de Moore. Los chips se hacen del mismo modo que los diseños sobre las camisetas. En vez de pulverizar pintura, se proyecta luz ultravioleta sobre una plantilla, marcando así un dibujo sobre capas de silicio. A continuación, los ácidos esculpen la imagen, creando cientos de millones de transistores. Pero este proceso llega a un límite cuando nos topamos con la escala del átomo. ¿Se convertirá entonces Silicon Valley en un simple cinturón industrial?

Hablaré de esto con más detalle en el capítulo 4, cuando analice la nanotecnología. En el resto del presente capítulo, supondremos que los físicos han

encontrado un sustituto para el poder del silicio, pero también asumiremos que la potencia de ordenador crece a una velocidad mucho más lenta que antes. Lo más probable es que los ordenadores sigan creciendo exponencialmente, pero el tiempo de duplicación ya no será de dieciocho meses, sino de muchos años.

MEZCLANDO LA REALIDAD REAL Y LA REALIDAD VIRTUAL

Para mediados de siglo tendríamos que estar todos viviendo en una mezcla de realidad real y realidad virtual. En nuestras gafas o lentes de contacto veremos simultáneamente imágenes virtuales superpuestas al mundo real. Esta es la visión de Susumu Tachi de la Universidad Keio, en Japón, y de muchos otros. Este científico está diseñando unas gafas especiales que fusionan la fantasía con la realidad. Su primer proyecto consiste en hacer que las cosas se esfumen en el aire.

Visité al profesor Tachi en Tokio y fui testigo de algunos de sus notables experimentos de mezcla de realidad real y realidad virtual. Una aplicación sencilla consiste en hacer que un objeto desaparezca (al menos, que desaparezca de las gafas del observador). En primer lugar, me puse un impermeable especial de color marrón claro. Al abrir y levantar los brazos, parecía una gran vela. Luego una cámara enfocó mi impermeable, y una segunda cámara filmó el escenario que había tras de mí, que era una carretera con autobuses y coches circulando por ella. Un momento después, un ordenador fusionó las dos imágenes, de tal modo que la imagen que había tras de mí fue proyectada sobre el impermeable, como sobre una pantalla. Mirando a través de una lente especial, mi cuerpo se había desvanecido, quedando solo las imágenes de los coches y los autobuses. Dado que mi cabeza estaba por encima del impermeable, parecía como si estuviera flotando en el aire, sin su cuerpo correspondiente, como Harry Potter cuando llevaba su capa de invisibilidad.

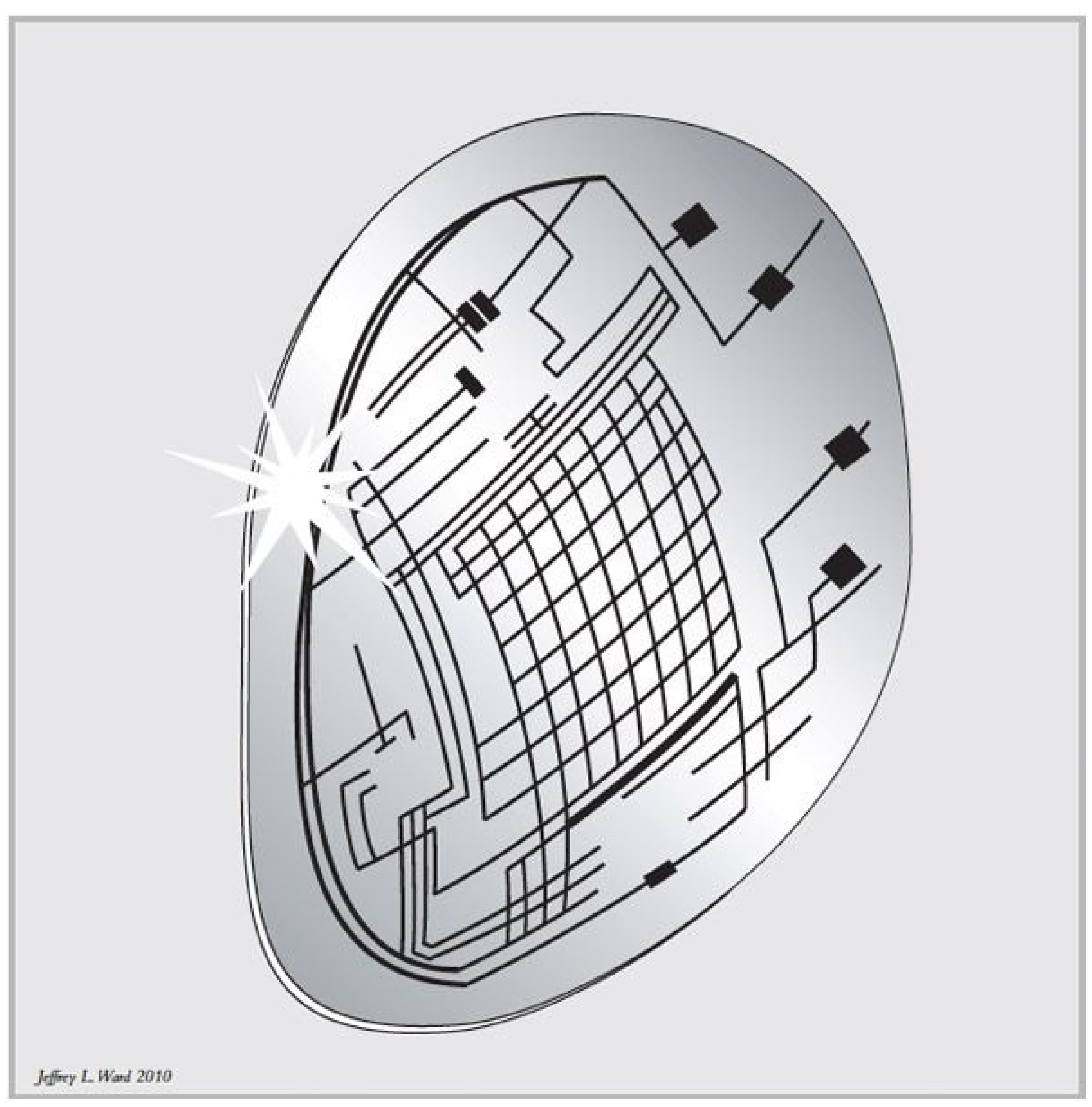
Entonces el profesor Tachi me mostró unas gafas especiales. Con ellas puestas, podía ver objetos reales y luego hacerlos desaparecer. No se trata de una invisibilidad auténtica, ya que solo funciona si se utilizan unas gafas especiales que fusionan dos imágenes. Sin embargo, esto forma parte del gran programa del profesor Tachi, que a veces recibe el nombre de «realidad ampliada».

A mediados del siglo, viviremos en un cibermundo que estará en pleno funcionamiento y fusionará el mundo real con imágenes procedentes de un ordenador. Esto podría cambiar de manera drástica los puestos de trabajo, el comercio, el consumo de ocio y, en general, nuestro modo de vida. La realidad ampliada tendría consecuencias inmediatas para el mercado. La primera aplicación comercial sería hacer que los objetos se volvieran invisibles, o hacer que lo invisible se volviera visible.

Por ejemplo, en el caso de un piloto o un conductor, este sería capaz de ver en un ángulo de 360 grados a su alrededor, o incluso bajo sus pies, porque las gafas o las

lentillas le permitirían ver a través de las paredes del avión o del coche. Así se eliminarían los puntos ciegos, que son responsables de gran cantidad de accidentes y muertes. En un combate aéreo, los pilotos podrían seguir la pista de los aviones enemigos allí donde estos volaran, incluso por debajo de su propio aparato, como si este fuera transparente. Los conductores de vehículos tendrían la posibilidad de ver en todas las direcciones, ya que unas cámaras diminutas controlarían en un entorno de 360 grados y enviarían las imágenes a sus lentes de contacto.

Esta aplicación también sería útil para un astronauta que haga reparaciones en el exterior de una nave espacial, porque podría ver a través de las paredes los compartimentos y el casco de la nave. Esto podría salvar vidas. Un obrero de la construcción que haga reparaciones bajo tierra, en medio de una maraña de cables, tuberías y válvulas, sabría exactamente cómo está conectado todo. Esto sería vital en los casos de explosiones de gas o vapor, cuando las tuberías ocultas tras los muros han de ser reparadas y conectadas de nuevo rápidamente.



Las lentes de contacto de internet reconocerán los rostros de las personas, expondrán sus biografías y traducirán sus palabras en forma de subtítulos. Los turistas las utilizarán para resucitar monumentos antiguos. Los artistas plásticos y los arquitectos las usarán para manipular y reconfigurar sus creaciones virtuales. Las posibilidades de la realidad ampliada son infinitas.

De manera similar, un técnico que haga prospecciones podría ver directamente a través del suelo los yacimientos de agua o petróleo. Las fotografías del terreno tomadas desde un avión o un satélite mediante rayos infrarrojos o ultravioletas pueden ser analizadas y luego introducidas en las lentes de contacto del técnico, proporcionándole así un análisis tridimensional del yacimiento y de lo que haya bajo la superficie. Mientras caminamos por un paisaje vacío, «veríamos» con nuestras lentes depósitos de valiosos minerales.

Además de hacer que los objetos se volvieran invisibles, podríamos hacer también lo contrario: conseguir que lo invisible se vuelva visible.

En el caso de un arquitecto, mientras camina por una habitación vacía, podrá «ver» en un instante la imagen tridimensional completa del edificio que está diseñando. Los diseños de su proyecto se le echarán encima mientras pasea por cada habitación. Las habitaciones vacías cobrarán vida de repente, llenándose de mobiliario, alfombras y decoraciones sobre las paredes, permitiéndole visualizar su creación en tres dimensiones antes de que la construya realmente. Al mover los brazos, podrá crear nuevas habitaciones, muros y mobiliario. En este mundo ampliado, tendrá el poder de un mago que, moviendo su varita mágica, crea cualquier objeto a voluntad.

LA REALIDAD AMPLIADA: UNA REVOLUCIÓN EN EL TURISMO, LAS ARTES Y LA GUERRA

Está claro que las implicaciones de la realidad ampliada son potencialmente enormes para el comercio y para el lugar de trabajo. Todo oficio puede verse enriquecido virtualmente por la realidad ampliada. Además, esta tecnología puede dar realce a nuestras vidas, nuestro ocio y nuestra sociedad.

Por ejemplo, un turista que pasea por un museo puede ir de un objeto expuesto a otro mientras sus lentes de contacto le proporcionan una descripción de cada uno de ellos; un guía virtual le facilitará un recorrido cibernético. Si el turista visita unas ruinas antiguas, podrá «ver» reconstrucciones completas de los edificios y monumentos en todo su esplendor, al tiempo que disfruta de anécdotas históricas. Los restos del Imperio romano, en vez de quedarse en unas columnas rotas rodeadas de malas hierbas, volverán a la vida a medida que el turista camina entre ellos, y se completarán mediante comentarios y notas.

El Instituto de Tecnología de Pekín ha dado ya los primeros pasos en esta dirección. Ha recreado en el ciberespacio el fabuloso Jardín del Esplendor Perfecto, que fue destruido por las fuerzas francobritánicas durante la segunda guerra del opio en 1860. Actualmente, todo lo que queda de este legendario jardín es la devastación que dejaron tras de sí aquellas tropas saqueadoras. Pero, si contemplamos las ruinas desde una plataforma especial de observación, podremos ver ante nosotros la totalidad del jardín en todo su esplendor. En el futuro esto será algo corriente.

Aún más avanzado es el sistema ideado por el inventor Nikolas Neecke, que ha creado un recorrido a pie por Basilea, Suiza. Al caminar por su casco viejo, se ven imágenes de antiguos edificios e incluso personas superpuestas al presente, como si el turista viajara en el tiempo. El ordenador detecta su posición y luego le muestra en sus gafas imágenes de escenas antiguas, como si lo transportara a la época medieval. Hoy en día se han de utilizar grandes gafas y una pesada mochila llena de aparatos electrónicos de GPS y ordenadores. El día de mañana todo esto estará contenido en unas lentes de contacto.

Si conducimos un coche en un país extranjero, todas las indicaciones aparecerán traducidas al inglés en nuestras lentes de contacto, de tal modo que no habrá que bajar la vista para verlas. Veremos las señales de tráfico junto con explicaciones relativas a cualquier objeto próximo, como, por ejemplo, los lugares de interés turístico. También veremos rápidas traducciones de las señales de tráfico.

Cualquier excursionista, campista o aficionado a las actividades al aire libre no solo conocerá su posición en un país extranjero, sino también los nombres de todas las plantas y todos los animales, y podrá ver un mapa de la zona y recibir partes meteorológicos. También verá senderos y lugares de acampada que podrían estar ocultos tras la maleza y los árboles.

Los que busquen un apartamento podrán ver qué es lo que hay disponible mientras caminan por la calle o circulan con su coche. Sus lentes expondrán el precio, las características, etcétera, de cualquier piso que esté en venta.

Al contemplar el cielo nocturno, veremos las estrellas y todas las constelaciones claramente dibujadas, como si estuviéramos viendo el espectáculo de un planetario, salvo que las estrellas que veamos serán reales. También sabremos dónde están situados los lejanos agujeros negros, las galaxias y otros fenómenos astronómicos interesantes, y podremos descargar explicaciones al respecto.

Además de poder ver a través de los objetos y visitar países extranjeros, la visión ampliada será esencial cuando necesitemos alguna información muy especializada en un momento dado.

Por ejemplo, en el caso de un actor, un músico o cualquier intérprete que tenga que memorizar gran cantidad de texto, podrá en el futuro ver todo su papel o toda su partitura en sus lentes de contacto. No habrá necesidad alguna de utilizar el teleprompter, la tarjeta que da el pie de entrada, las partituras o las notas escritas para recordar lo que se ha de decir o interpretar. Y nunca más hará falta memorizar.

Otros ejemplos son los siguientes:

- Un estudiante que haya faltado a una clase podrá descargar clases impartidas por profesores virtuales sobre cualquier tema y verlas tranquilamente. Mediante la telepresencia, la imagen de un profesor real podría aparecer frente al alumno y responder a todas las preguntas que este desee hacerle. También será posible ver la realización de experimentos, vídeos, etcétera, a través de las lentes de contacto.
- Un soldado que esté en acción podrá recibir a través de unas gafas especiales o por unos auriculares todo tipo de informaciones actualizadas en cuanto a mapas, posición del enemigo, dirección del fuego enemigo, instrucciones de sus superiores, etcétera. En medio del intercambio de fuego con el enemigo, cuando las balas silben en todas las direcciones, podrá ver a través de las colinas, o de cualquier obstáculo, y así localizar a las tropas hostiles, porque unos aviones teledirigidos podrán identificar la posición de estas.

- Un cirujano que realice una delicada operación de urgencia podrá ver el interior del paciente, a través del cuerpo mediante aparatos portátiles de resonancia magnética, o mediante sensores que se desplazan por el interior del cuerpo, al tiempo que tendrá acceso a todos los historiales médicos y vídeos de anteriores operaciones.
- Para divertirse con un videojuego, bastará con hacer una inmersión en el ciberespacio mediante las lentes de contacto. Aunque estemos en una habitación vacía, podremos ver a todos nuestros amigos en imágenes tridimensionales perfectas y percibir un paisaje extraterrestre mientras nos preparamos para entrar en combate con los alienígenas. Será como si el jugador y todos sus compañeros estuvieran en el campo de batalla de un planeta desconocido, rodeados de ráfagas de rayos disparadas desde todos los lados.
- Si necesitamos consultar las estadísticas de cualquier atleta o datos concretos relativos a actividades deportivas, la información aparecerá al instante en nuestras lentes de contacto.

Esto significa que ya no necesitaremos el teléfono móvil, ni relojes, ni reproductores de MP3. Todos los iconos de nuestros diversos artilugios manuales se proyectarán sobre las lentes de contacto, de tal modo que podremos acceder a ellos cuando queramos. De este modo se podrá acceder a las llamadas telefónicas, los sitios web de música, etcétera. Muchos de los aparatos y de las aplicaciones que tenemos en casa pueden ser sustituidos por la realidad ampliada.

Otra científica que está ensanchando las fronteras de la realidad ampliada es Pattie Maes, del MIT Media Lab. En vez de utilizar lentes de contacto o gafas especiales, esta investigadora trabaja en la idea de proyectar una pantalla de ordenador sobre objetos comunes de nuestro entorno. Su proyecto, llamado SixthSense, incluye el uso de una cámara y un proyector diminutos que llevaríamos colgados del cuello, como un medallón. Este artilugio puede proyectar la imagen de una pantalla de ordenador sobre cualquier cosa que tengamos enfrente, como serían una pared o una mesa. Pulsando unas teclas imaginarias, el ordenador se activaría automáticamente, igual que si estuviéramos tecleando en un teclado real. Dado que la imagen de la pantalla del ordenador puede proyectarse sobre cualquier objeto plano y sólido que tengamos frente a nosotros, podremos convertir cientos de objetos en pantallas.

Otra posibilidad es llevar unos dedales especiales en el pulgar y en el resto de los dedos. Al mover estos, el ordenador ejecuta las instrucciones correspondientes sobre la pantalla que tenemos en la pared. Por ejemplo, moviendo los dedos podemos dibujar imágenes en la pantalla. Es posible utilizar los dedos en vez de un ratón para

controlar el cursor. Y, si unimos las manos para formar un cuadrado, podemos activar una cámara digital y tomar imágenes.

Además, esto significa que, cuando vayamos de compras, el ordenador hará un barrido por los distintos artículos, identificará lo que es cada uno y luego nos dará un informe completo de sus ingredientes, su contenido en calorías y las opiniones de otros consumidores. Dado que los chips serán más baratos que los códigos de barras, todos los productos comerciales tendrán sus propias etiquetas inteligentes, a las que podremos acceder para explorar su información.

Otra aplicación de la realidad ampliada podría se la visión por rayos X, muy similar a la que aparece en los cómics de Superman, que utiliza un procedimiento llamado «rayos X de retrodispersión». Si las gafas o las lentes de contacto son sensibles a los rayos X, será posible ver a través de los muros. Al echar una mirada a nuestro alrededor, seremos capaces de ver a través de los objetos, tal como sucede en los cómics. Cualquier niño, cuando lee los cómics de Superman por primera vez, sueña con ser «más rápido que las balas, más fuerte que una locomotora». Miles de niños se ponen capas, saltan en el aire y pretenden tener una visión de rayos X, pero ahora esto es también una posibilidad real.

Un problema que plantean los rayos X ordinarios es que se ha de colocar una placa detrás del objeto, exponer este a los rayos X y luego revelar la placa. Pero los rayos X de retrodispersión resuelven estos problemas. En primer lugar, tenemos unos rayos X que surgen de una fuente de luz que puede bañar toda una habitación. Luego rebotan sobre las paredes y pasan desde atrás a través del objeto que queremos examinar. Nuestras gafas son sensibles a los rayos X que han atravesado el objeto. Las imágenes vistas mediante rayos X de retrodispersión pueden ser tan buenas como las imágenes que encontramos en los cómics. (Aumentando la sensibilidad de las gafas es posible reducir la intensidad de los rayos X, con el fin de minimizar cualquier riesgo para la salud).

TRADUCTORES UNIVERSALES

En *Star Trek*, en *La guerra de las galaxias* y prácticamente en todas las películas de ciencia ficción, resulta curioso que los extraterrestres hablen inglés a la perfección. Esto se debe a que existe algo llamado «traductor universal» que permite a los terrícolas comunicarse al instante con cualquier civilización extraterrestre, salvando así el inconveniente de tener que recurrir al lenguaje de signos y gestos primitivos para establecer comunicación con alguien que no sea de nuestro planeta.

Aunque en otro tiempo se pensó que se trataba de futurología irreal, ya existen versiones del traductor universal. Esto significa que en el futuro, si somos turistas en un país extranjero y hablamos con los nativos, veremos los subtítulos correspondientes en nuestras lentes de contacto, como si estuviéramos viendo una

película en lengua extranjera. También podemos hacer que nuestro ordenador cree una traducción hablada que entre en nuestros oídos. Esto quiere decir que será posible ver cómo dos personas sostienen una conversación, hablando cada una su propio idioma, mientras oyen la traducción en sus oídos, si ambas tienen el traductor universal. La traducción no será perfecta, ya que siempre habrá problemas con las frases hechas, el argot y las expresiones castizas y coloristas, pero será suficientemente buena para comprender la esencia de lo que dice la otra persona.

Los científicos están haciendo realidad este proyecto de diversos modos. Lo primero es crear un programa que pueda convertir la palabra hablada en escritura. A mediados de la década de 1990 se pusieron a la venta en el mercado los primeros programas de reconocimiento del lenguaje hablado. Podían reconocer hasta 40.000 palabras con un 95 por ciento de aciertos. Dado que una conversación cotidiana típica utiliza solo de 500 a 1.000 palabras, estos programas son más que adecuados. Una vez que se ha realizado la transcripción de la voz humana, cada palabra se traduce al otro idioma mediante un diccionario informático. Luego viene la parte más difícil: colocar las palabras en el contexto, añadir argot, expresiones coloquiales, etcétera, todo lo cual requiere una sofisticada comprensión de los matices del lenguaje. Este campo recibe el nombre de CAT (*computer assisted translation*: traducción asistida por ordenador).

Otro modo es el que se está experimentando en la Universidad Carnegie Mellon, en Pittsburgh. Estos científicos tienen ya prototipos que pueden traducir del chino al inglés, y del inglés al español o al alemán. Colocan unos electrodos en el cuello y el rostro de la persona que está hablando; estos electrodos captan la contracción de los músculos y descifran las palabras que se están diciendo. Su trabajo no requiere un equipo de audio, ya que las palabras pueden articularse en silencio. Luego, un ordenador traduce estas palabras y un sintetizador de voz las pronuncia en voz alta. En una conversación sencilla de entre 100 y 200 palabras, han obtenido un 80 por ciento de exactitud.

«La idea es que una persona articula palabras en inglés y salen del proceso en chino o en otro idioma», dice Tanja Schultz, una investigadora de la mencionada universidad. En el futuro, podría ser que un ordenador leyera los labios de la persona con la que estamos hablando, por lo que los electrodos no serían necesarios. Así pues, en principio, es posible que dos personas mantengan una conversación ágil, aunque hablen dos idiomas diferentes.

En el futuro, será posible que las barreras del idioma, que en otro tiempo impidieron el entendimiento mutuo entre culturas, vayan cayendo gradualmente gracias a este traductor universal y a las gafas o lentes de contacto con internet.

Aunque la realidad ampliada abre las puertas a un mundo totalmente nuevo, existen limitaciones. El problema no será el soporte físico (o *hardware*); tampoco la anchura de la banda será un factor limitante, ya que no hay límite para la cantidad de información que puede transportarse mediante cables de fibra óptica.

El auténtico embudo es el soporte lógico (o *software*). La creación de programas informáticos solo puede hacerse a la vieja usanza: una persona, sentada tranquilamente en una silla, y provista de lápiz, papel y un ordenador portátil, tiene que escribir línea por línea los códigos que hacen que estos mundos imaginarios cobren vida. Se puede producir masivamente el soporte físico y aumentar su potencia apilando más y más chips, pero no se puede fabricar un cerebro humano. Esto implica que la implantación de un mundo realmente ampliado necesitará todavía décadas, hasta mediados de siglo.

LOS HOLOGRAMAS Y LAS TRES DIMENSIONES

Otro avance tecnológico que podríamos ver a mediados de siglo es la televisión y el cine auténticamente tridimensionales. Si nos remontamos a la década de 1950, en aquellos tiempos, para ver películas en tres dimensiones era preciso ponerse unas toscas gafas cuyas lentes estaban coloreadas en azul y rojo. Se aprovechaba el hecho de que el ojo izquierdo y el derecho están ligeramente desalineados; la pantalla de cine mostraba dos imágenes, una azul y otra roja. Dado que estas gafas actuaban como filtros que producían dos imágenes distintas para el ojo izquierdo y el derecho, se tenía la ilusión óptica de ver tres dimensiones cuando el cerebro fusionaba las dos imágenes. Por consiguiente, la percepción de profundidad era un truco. (Cuanto más separados estuvieran los ojos del espectador, mayor era la percepción de profundidad. Esta es la razón por la que algunos animales tienen los ojos fuera de la cabeza: para que la percepción de profundidad sea máxima).

Una mejora de este procedimiento consiste en tener gafas de tres dimensiones hechas con cristal polarizado, de tal modo que al ojo izquierdo y al derecho se les muestren dos imágenes polarizadas diferentes. De esta manera, es posible ver imágenes tridimensionales a todo color, y no solo en rojo y azul. Puesto que la luz es una onda, puede vibrar hacia arriba y hacia abajo, o hacia la izquierda y la derecha. Una lente polarizada es un cristal que solo deja pasar una dirección de la luz. Por consiguiente, si tenemos en las gafas dos lentes polarizadas con direcciones de polarización diferentes, podemos crear un efecto tridimensional. Una versión más sofisticada de las tres dimensiones sería tener dos imágenes diferentes transmitidas al interior de nuestras lentes de contacto.

Ya están en el mercado unos televisores en tres dimensiones que exigen la utilización de unas gafas especiales. Pero pronto habrá unos televisores que no requerirán el uso de gafas, sino de lentes lenticulares. En este caso, la pantalla del televisor está hecha de una forma especial para proyectar dos imágenes separadas, con ángulos ligeramente diferentes, una para cada ojo. En consecuencia, los ojos ven imágenes separadas, y esto crea la ilusión óptica de las tres dimensiones. Sin embargo, la cabeza debe estar en la posición correcta; existen los llamados *sweet*

spots, o puntos sensibles, que son los puntos en que han de estar los ojos mientras miran la pantalla. (Esto se basa en una ilusión óptica muy conocida. En algunos centros comerciales vemos imágenes que cambian como por arte de magia a medida que pasamos por delante de ellas. Esto se hace tomando dos fotografías, cortando cada una de ellas en muchas tiras estrechas e intercalando luego estas tiras para crear una imagen compuesta. Sobre esta composición se coloca luego una lámina de cristal lenticular con muchas estrías verticales, de tal modo que cada estría esté exactamente sobre dos de las tiras. La estría está configurada de tal modo que, al mirar desde un ángulo, veamos una de las dos tiras y, al mirar desde otro, veamos la otra. Por lo tanto, al pasar por delante del cristal, vemos que una de las fotografías se transforma de repente en la otra, y viceversa. La televisión tridimensional sustituirá estas fotografías fijas por imágenes en movimiento, con el fin de lograr el mismo efecto sin necesidad de utilizar gafas).

Sin embargo, la versión más avanzada de la técnica tridimensional serán los hologramas. Sin utilizar ningún tipo de lentes, se vería el frente de onda exacto de una imagen tridimensional, como si esta estuviera colocada directamente delante del observador. Durante décadas hemos estado viendo hologramas en nuestro entorno (aparecen en centros comerciales, tarjetas de crédito y exposiciones), y se muestran con regularidad en las películas de ciencia ficción. En *La guerra de las galaxias* el argumento empezaba con un mensaje holográfico tridimensional enviado por la princesa Leia para pedir socorro a los miembros de la Alianza Rebelde.

El problema es que resulta muy complicado crear hologramas.

Los hologramas se hacen tomando un único rayo láser y dividiéndolo en dos. Uno de los rayos resultantes incide sobre el objeto, sale reflejado y va a dar sobre una pantalla especial. El otro rayo láser incide directamente sobre la pantalla. La mezcla de los dos rayos crea un patrón de interferencia complejo que contiene la imagen tridimensional del objeto original «congelada», y esta imagen es entonces captada por una película especial que hay sobre la pantalla. Entonces, enviando otro rayo láser a través de la pantalla, la imagen del objeto original cobra vida con un aspecto totalmente tridimensional.

La televisión holográfica plantea dos problemas. En primer lugar, la imagen ha de ser dirigida a una pantalla. El espectador que se sienta frente a dicha pantalla ve la imagen tridimensional exacta del objeto original. Pero no puede acercarse y tocar el objeto. La imagen tridimensional que ve ante sí es una ilusión óptica.

Esto significa que, si estamos viendo un partido de fútbol en tres dimensiones en nuestra televisión holográfica, con cualquier movimiento que hagamos la imagen que tenemos delante cambiará como si fuese real. Podría parecer que estamos sentados justo en la banda, mirando el juego prácticamente al lado de los futbolistas que están en el campo. Sin embargo, si intentamos dar un salto para agarrar el balón, nos daremos de cabeza contra la pantalla.

El auténtico problema real que ha impedido el desarrollo de la televisión holográfica es el del almacenamiento de información. Cualquier imagen tridimensional contiene una enorme cantidad de información: un montón de veces la información almacenada en una imagen bidimensional. Los ordenadores procesan habitualmente imágenes bidimensionales, ya que cada imagen está formada por unos puntos pequeñísimos, llamados píxeles, y cada píxel está iluminado por un transistor diminuto. Pero, para hacer un movimiento con imágenes tridimensionales, necesitamos lanzar treinta imágenes por segundo. Basta un cálculo rápido para demostrar que la información necesaria para generar imágenes holográficas tridimensionales en movimiento excede ampliamente la capacidad del sistema actual de internet.

A mediados de siglo puede que este problema ya esté resuelto, puesto que el ancho de banda de internet se expande exponencialmente.

¿Cómo podría ser la auténtica televisión tridimensional?

Una posibilidad es la de una pantalla con forma de cilindro o bóveda, y el telespectador sentado dentro de ella. Cuando la imagen holográfica se envía a la pantalla, vemos que las imágenes tridimensionales nos rodean, como si estuvieran realmente allí.

EL FUTURO LEJANO (DESDE 2070 HASTA 2100)

LA MENTE DOMINANDO LA MATERIA

A finales de este siglo controlaremos los ordenadores directamente con nuestras mentes. Al igual que los dioses griegos, pensaremos ciertas órdenes, y nuestros deseos serán obedecidos. Los fundamentos de esta tecnología están ya establecidos. Sin embargo, puede que se necesiten décadas de trabajo duro para perfeccionarlos. Esta revolución tiene dos partes: en primer lugar, la mente tiene que ser capaz de controlar los objetos que hay a su alrededor, y en segundo lugar, es preciso un ordenador que descifre los deseos de las personas con el fin de poder hacerlos realidad.

El primer avance importante se produjo en 1998, cuando varios científicos de la Universidad Emory y de la Universidad de Tubinga, Alemania, introdujeron un diminuto electrodo de cristal en el cerebro de un hombre de cincuenta y seis años que estaba paralizado a consecuencia de un ataque de apoplejía. Este electrodo se conectó a un ordenador que analizaba las señales emitidas por el cerebro. El apopléjico consiguió ver una imagen del cursor sobre la pantalla del ordenador. Entonces, mediante retroacción biológica (*biofeedback*), fue capaz de mover el cursor solo con

el pensamiento. Por primera vez se estableció un contacto directo entre el cerebro humano y un ordenador.

La versión más sofisticada de esta teoría es la que ha desarrollado en la Universidad Brown el neurocientífico John Donoghue, que ha creado un dispositivo llamado BrainGate para ayudar a comunicarse a las personas que han sufrido lesiones cerebrales debilitadoras. Este invento causó sensación en los medios de comunicación e incluso fue portada de la revista *Nature* en 2006.

Donoghue me dijo que su sueño era conseguir que el BrainGate revolucionara el modo en que tratamos las lesiones cerebrales, aprovechando todo el potencial de la revolución informática. Este artilugio ha tenido ya un impacto tremendo en las vidas de sus pacientes, y la gran esperanza de su inventor es seguir desarrollando esta tecnología. Tiene un interés personal en esta investigación porque, de niño, vivió confinado a una silla de ruedas a causa de una enfermedad degenerativa y, por consiguiente, conoce esa sensación de impotencia.

Entre sus pacientes hay víctimas de apoplejía que se encuentran totalmente paralizadas y son incapaces de comunicarse con sus seres queridos, aunque sus cerebros estén activos. Ha implantado un chip de 4 milímetros de anchura en el cerebro de un paciente que ha sufrido un ataque de apoplejía, en la zona que controla los movimientos del aparato locomotor. Este chip está conectado a un ordenador que analiza y procesa las señales del cerebro y envía finalmente el mensaje a un ordenador portátil.

Al principio, el paciente no controla la posición del cursor, pero puede ver por dónde se está moviendo este. Probando y equivocándose, el paciente aprende a controlarlo y, tras varias horas de intentos, es capaz de colocar el cursor en cualquier posición dentro de la pantalla. Con la práctica, el apopléjico puede leer y escribir correos electrónicos y jugar con videojuegos. En principio, cualquier persona paralizada tendría que ser capaz de realizar cualquier función que pueda ser controlada por ordenador.

Inicialmente, Donoghue comenzó con cuatro pacientes, dos de los cuales tenían lesiones de la médula espinal, otro había sufrido una apoplejía, y el cuarto tenía esclerosis lateral amiotrófica. Uno de ellos, un tetrapléjico paralizado desde el cuello hasta los pies, solo tardó un día en controlar el movimiento del cursor con su mente. Hoy en día es capaz de manejar un televisor, mover el cursor en un ordenador, jugar con un videojuego y leer su correo electrónico. Los pacientes pueden también controlar su movilidad manejando una silla de ruedas motorizada.

A corto plazo, esto es poco menos que milagroso para las personas que están totalmente paralizadas. Un día están atrapadas, impotentes dentro de sus cuerpos, y, al día siguiente, están navegando por la web y manteniendo conversaciones con otras personas de todo el mundo.

(En una ocasión asistí a una recepción de gala que se celebraba en el Lincoln Center de Nueva York en honor de Stephen Hawking. Era impresionante verle atado

a su silla de ruedas, incapaz de mover parte alguna de su cuerpo, salvo unos pocos músculos faciales y los párpados, con unas enfermeras sujetándole la cabeza bamboleante y empujándolo con la silla de un lugar a otro. Hawking necesita horas y días de agotadores esfuerzos para comunicar algunas ideas sencillas mediante su sintetizador de voz. Me pregunté si no le llegaría demasiado tarde la posibilidad de beneficiarse de la tecnología del BrainGate. Entonces John Donoghue, que también estaba entre la audiencia, vino a saludarme. Quizá el BrainGate sea la mejor opción para Hawking).

Otro grupo de científicos de la Universidad Duke han logrado resultados similares experimentando con monos. Miguel A. L. Nicolelis y su grupo han implantado un chip en el cerebro de un mono. Este chip está conectado a un brazo mecánico. Al principio, el mono agita y sacude el brazo mecánico, porque no comprende cómo ha de operar para manejarlo. Sin embargo, con un poco de práctica, estos monos son capaces de controlar lentamente los movimientos del brazo mecánico utilizando el poder de sus cerebros: por ejemplo, consiguen agarrar una banana. Pueden mover el brazo mecánico instintivamente, sin pensar, como si fuera su propio brazo. «Existen pruebas fisiológicas de que, durante el experimento, se sienten más conectados con los robots que con sus propios cuerpos», afirma Nicolelis[4].

Esto significa también que algún día seremos capaces de controlar las máquinas usando para ello únicamente el pensamiento. Las personas que sufren parálisis también pueden controlar de este modo las piernas y los brazos mecánicos. Por ejemplo, se podría conectar el cerebro de una persona directamente a estas prótesis, prescindiendo de la médula espinal, para que el paciente pueda andar de nuevo. Además, estos procedimientos pueden ser la base para llegar a controlar nuestro entorno mediante el poder de la mente.

LEER LA MENTE

Si el cerebro puede controlar un ordenador o un brazo mecánico, ¿podrá un ordenador leer los pensamientos de una persona sin implantar electrodos en su cerebro?

Desde 1875 se sabe que el funcionamiento del cerebro se basa en el hecho de que la electricidad circula a través de sus neuronas, lo cual genera unas débiles señales eléctricas que pueden medirse colocando electrodos en torno a la cabeza. Analizando los impulsos eléctricos que detectan dichos electrodos, pueden registrarse las ondas cerebrales. Este procedimiento recibe el nombre de electroencefalograma (EEG) y puede registrar grandes cambios en el cerebro, tales como el acto de dormir y también estados emocionales como el nerviosismo, la ira, etcétera. El resultado del EEG puede mostrarse en la pantalla de un ordenador, y el sujeto puede observarlo. Al cabo de un rato, la persona tiene la posibilidad de mover el cursor solo con el pensamiento.

Niels Birbaumer, de la Universidad de Tubinga, ha conseguido ya entrenar a personas parcialmente paralizadas para que escriban frases sencillas utilizando este método.

Incluso los fabricantes de juguetes van a beneficiarse de todo esto. Varias empresas de juguetes, incluida NeuroSky, comercializan una cinta que se ajusta en la cabeza y contiene un electrodo del tipo EEG, es decir, de los que se utilizan para los electroencefalogramas. Si el usuario se concentra de un modo determinado, puede activar el EEG contenido en la cinta, para que este controle el juguete. Por ejemplo, valiéndose meramente del pensamiento, puede levantar una pelota de ping pong que está dentro de un cilindro.

La gran ventaja del EEG es que puede detectar rápidamente varias frecuencias emitidas por el cerebro, sin necesidad de usar aparatos caros o sofisticados. Sin embargo, un gran inconveniente es que el EEG no puede localizar pensamientos en ubicaciones específicas dentro del cerebro.

Un método mucho más sensible es la exploración mediante la imagen por resonancia magnética funcional (IRMf). Las exploraciones que realizan el EEG y la IRMf presentan unas diferencias importantes. Un aparato de EEG es un artilugio pasivo que se limita a captar señales eléctricas procedentes del cerebro, por lo que no podemos determinar con precisión la ubicación de la fuente. Un equipo de IRMf utiliza los «ecos» generados por ondas de radio para examinar el interior de los tejidos vivos. Esto permite localizar con toda precisión la fuente de las diversas señales y nos ofrece unas espectaculares imágenes tridimensionales del interior del cerebro.

El equipo de IRMf es muy caro y requiere un laboratorio lleno de un pesado equipamiento, pero nos ha proporcionado ya unos detalles asombrosos del modo en que funciona un cerebro pensante. La exploración mediante IRMf permite a los científicos localizar la presencia del oxígeno contenido en la hemoglobina de la sangre. Dado que la hemoglobina oxigenada contiene la energía que mantiene la actividad de las células, la detección de este flujo de oxígeno permite rastrear el flujo de los pensamientos dentro del cerebro.

Joshua Freedman, psiquiatra de la Universidad de California, Los Ángeles, dice lo siguiente: «Es como ser astrónomo en el siglo XVI, después de la invención del telescopio. Durante milenios hubo personas muy inteligentes que intentaban comprender lo que sucedía en los cielos, pero en relación con lo que pudiera haber más allá de la mera visión del ojo humano únicamente podían especular. Entonces, de repente, surgió una nueva tecnología que les permitió ver directamente lo que había allí[5]».

De hecho, las exploraciones realizadas mediante IRMf pueden detectar incluso el movimiento de los pensamientos dentro del cerebro vivo con una resolución de hasta 0,1 milímetros, es decir, menos que el tamaño de una cabeza de alfiler, lo que corresponde quizá a unos pocos miles de neuronas. Así, la IRMf puede darnos, con una precisión asombrosa, imágenes tridimensionales del flujo de energía que se

produce dentro de un cerebro pensante. Finalmente, pueden construirse unos equipos de IRMf que lleguen en su exploración hasta las neuronas individualmente, en cuyo caso sería posible obtener los patrones neuronales correspondientes a pensamientos específicos.

Kendrick Kay y sus colegas de la Universidad de California en Berkeley han sido recientemente los artífices de un gran avance. Realizaron una exploración por IRMf a una serie de personas mientras estas contemplaban fotografías de diversos objetos, tales como alimentos, animales, seres humanos y cosas corrientes de distintos colores. Kay y sus colegas crearon un programa informático que asociaba estos objetos con los correspondientes patrones de la IRMf. Cuantos más objetos veían estos individuos, mejor era el resultado que daba el programa informático en la identificación de esos objetos con las exploraciones por IRMf.

A continuación, mostraron a las mismas personas unos objetos totalmente nuevos, y el programa informático en muchos casos relacionó correctamente el objeto con la exploración por IRMf. Al mostrar 120 fotografías de nuevos objetos, el programa informático identificó los objetos y la exploración por IRMf con un 90 por ciento de aciertos. Cuando se les mostraron a los sujetos 1.000 fotografías nuevas, el porcentaje de aciertos del programa informático fue del 80 por ciento.

Kay afirma que «a partir de un gran conjunto de imágenes naturales completamente nuevas, es posible identificar qué imagen concreta ha visto un observador… Puede que muy pronto sea posible reconstruir una imagen de la experiencia visual de una persona únicamente a partir de las mediciones de su actividad cerebral[6]».

El objetivo de este planteamiento es crear un «diccionario del pensamiento», de modo que cada objeto esté en correspondencia exacta con cierta imagen obtenida por IRMf. Examinando el patrón obtenido por IRMf se podrá averiguar en qué objeto está pensando la persona. Finalmente, un ordenador examinará quizá miles de patrones de IRMf que le lleguen a raudales desde un cerebro que está pensando, y descifrará cada uno de ellos. De este modo, se podrá descodificar el flujo de conciencia de una persona.

FOTOGRAFIAR UN SUEÑO

Sin embargo, el problema de esta técnica es que, aunque consiga decirnos, por ejemplo, si alguien está pensando en un perro, no puede reproducir la imagen real de ese perro. Una nueva línea de investigación es la que intenta reconstruir la imagen exacta de aquello en lo que está pensando el cerebro, de tal modo que sea posible realizar un vídeo de los pensamientos de una persona. De esta manera se podría hacer la grabación en vídeo de un sueño.

Desde tiempos inmemoriales, a la gente le han fascinado los sueños, esas efímeras imágenes que a veces no conseguimos recordar o comprender, lo cual resulta frustrante. Hollywood ya previó hace tiempo la existencia de aparatos que algún día enviarían al cerebro pensamientos oníricos, o incluso los grabarían, al igual que sucede en algunas películas como *Desafío total*. No obstante, todo esto no pasaba de ser una mera especulación.

Lo era, sí, hasta hace poco.

Los científicos han realizado notables progresos en un proyecto que en otros tiempos se consideraba imposible: tomar una instantánea de nuestros recuerdos y, posiblemente, de nuestros sueños. Los primeros pasos en esta dirección los dieron unos científicos del Laboratorio de Neurociencia Computacional para la Investigación de Telecomunicaciones Avanzadas de Kioto. Mostraron a los sujetos del experimento un diminuto punto de luz situado en una posición determinada. Luego hicieron una exploración por IRMf para registrar el lugar en que el cerebro almacenaba esa información. A continuación, movieron el puntito luminoso y registraron el lugar en que el cerebro almacenaba esa nueva imagen. Finalmente, obtuvieron un gráfico exacto de los lugares en que los resultados de ver puntitos luminosos se almacenaban en el cerebro. Los puntos luminosos se situaban en una red de 10 × 10.

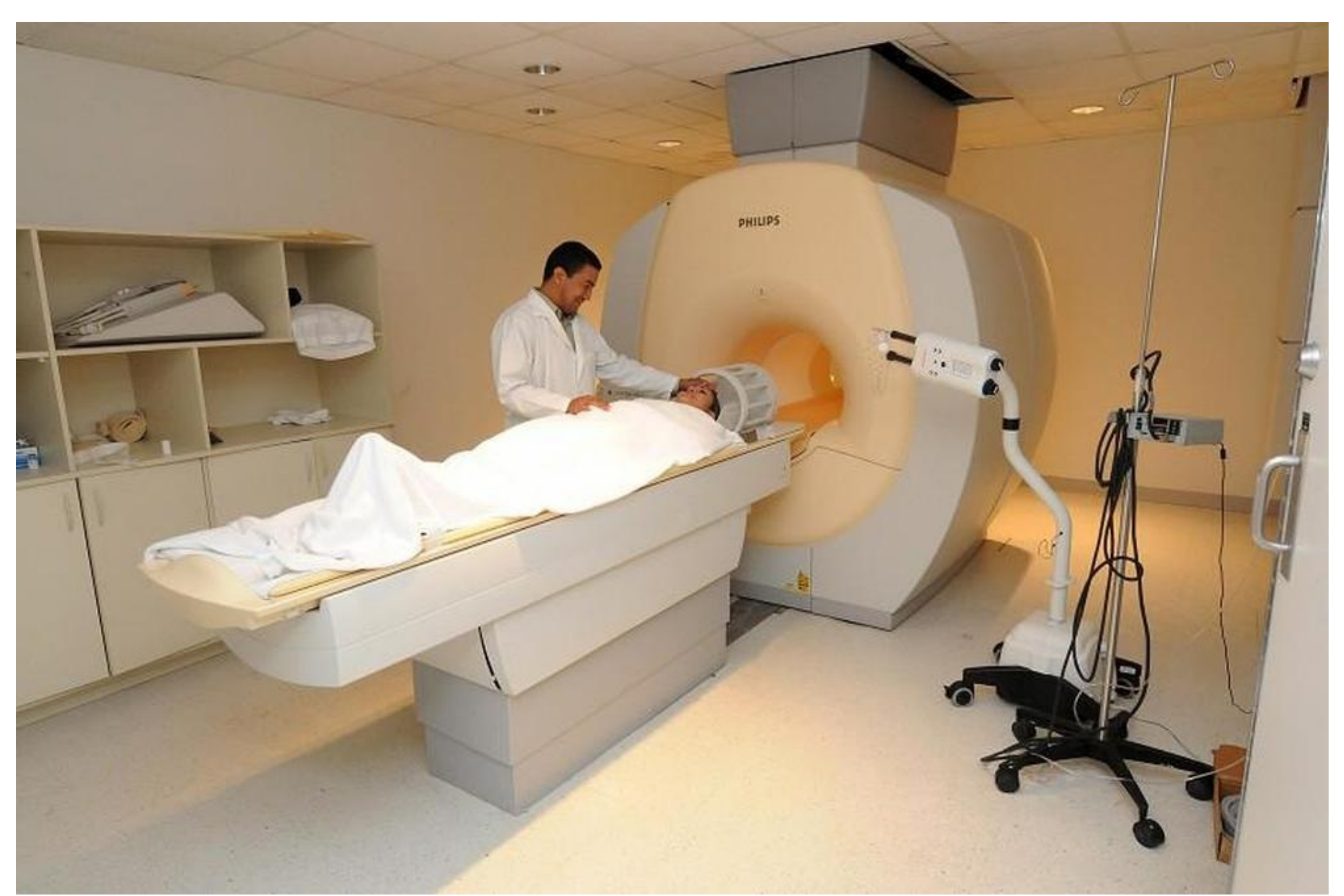
Entonces los científicos lanzaron la imagen de un objeto sencillo formado por estos 10 × 10 puntos, tal como una herradura. Mediante un ordenador consiguieron analizar el modo en que el cerebro almacenaba esta imagen. Efectivamente, el patrón almacenado por el cerebro era la suma de las imágenes que formaban la herradura.

De esa manera, estos científicos lograron crear una imagen de lo que ve el cerebro. Cualquier patrón de luces contenido en esta red 10 × 10 se puede descodificar mediante un ordenador, mirando las exploraciones cerebrales realizadas por IRMf.

La idea de estos científicos es incrementar en el futuro el número de píxeles de su red 10 × 10. Además, afirman que este proceso es universal, es decir, cualquier pensamiento visual, o incluso cualquier sueño, tendría que ser detectable mediante la exploración por IRMf. Si esto fuera cierto, significaría que, por primera vez en la historia, seríamos capaces de grabar las imágenes que vemos en nuestros sueños.

Por supuesto, nuestras imágenes mentales, y en especial las de nuestros sueños, nunca son totalmente nítidas, y siempre tienen un cierto carácter difuso, pero el mero hecho de poder contemplar los pensamientos visuales en las profundidades del cerebro de una persona es de por sí algo notable.





Lectura del pensamiento mediante exploraciones de EEG (*arriba*) y de IRMf (*abajo*). En el futuro estos electrodos estarán miniaturizados. Podremos leer los pensamientos y también dar órdenes a determinados objetos utilizando solo nuestra actividad pensante.

LEER LA MENTE PUEDE PLANTEAR PROBLEMAS ÉTICOS

Todo esto plantea un problema: ¿qué sucedería en el caso de que pudiéramos leer los pensamientos de la gente de manera rutinaria? Al premio Nobel David Baltimore, antiguo presidente del Instituto de Tecnología de California (Caltech), le preocupa este problema, y ha escrito lo siguiente: «¿Podemos interceptar los pensamientos de los demás?…[7] No creo que esto sea meramente ciencia ficción, y convertiría el mundo en un infierno. Imagínese que va a ligar y le leen el pensamiento, o la negociación de un contrato, sin poder disimular lo que uno piensa».

Baltimore piensa que la lectura de la mente tendrá casi siempre algunas consecuencias embarazosas, pero no catastróficas. Ha escrito lo siguiente: «Me han dicho que, en plena clase impartida por un profesor… una parte importante [de los estudiantes] está inmersa en fantasías eróticas[8]».

Sin embargo, puede que la lectura de la mente no llegue a ser una cuestión tan íntima, ya que en su mayoría los pensamientos no suelen estar claramente definidos. Algún día quizá sea posible fotografiar nuestros sueños diurnos y nocturnos, pero la calidad de las imágenes obtenidas podría decepcionarnos. Recuerdo que, hace años, leí un relato breve en el que un genio le decía a un hombre: «Podrás tener cualquier cosa que imagines». El hombre imaginó inmediatamente unos artículos de lujo muy

caros, como limusinas, millones de dólares en efectivo y un castillo. Entonces el genio materializó al instante todas esas cosas. Pero, cuando el hombre las examinó detenidamente, se sorprendió al ver que la limusina no tenía tiradores en las puertas, ni motor, las caras de los billetes estaban borrosas y el castillo se encontraba vacío. Con las prisas, al imaginar esos objetos, olvidó que las imágenes existían en su mente solo como conceptos genéricos.

Además, hay dudas con respecto a la posibilidad de leer la mente de alguien a cierta distancia. Todos los procedimientos estudiados hasta ahora (incluidos el EEG, la IRMf y los electrodos implantados en el cerebro) requieren un contacto estrecho con el sujeto.

No obstante, pueden promulgarse leyes que limiten la lectura no autorizada de la mente. Asimismo, pueden crearse aparatos que protejan nuestros pensamientos interfiriendo, bloqueando o mezclando las señales eléctricas que emitimos.

Faltan todavía muchas décadas para llegar a una auténtica lectura de la mente. Sin embargo, como mínimo, el escáner de IRMf podría funcionar como un detector de mentiras algo primitivo. El hecho de decir una mentira hace que en el cerebro se activen más centros que cuando se dice la verdad. Decir una mentira implica que conocemos la verdad, pero estamos pensando también en la mentira y sus múltiples consecuencias, lo cual requiere mucha más energía que el simple hecho de decir la verdad. Por consiguiente, una exploración del cerebro mediante IRMf tendría que detectar este gasto suplementario de energía. Actualmente, la comunidad científica tiene algunas reservas con respecto a aceptar que los detectores de mentiras por IRMf tengan la última palabra, sobre todo en los procesos judiciales. Esta tecnología es todavía demasiado nueva para aportar un método de detección de mentiras que sea infalible. Sus promotores afirman que se realizarán más investigaciones para refinar su precisión. Esta tecnología tendrá que esperar todavía un poco.

Hay ya dos empresas comerciales que ofrecen detectores de mentiras por IRMf y afirman que su tasa de aciertos es del 90 por ciento. En la India un tribunal ha utilizado ya la IRMf para juzgar un caso, y en los tribunales de Estados Unidos hay actualmente varios casos en los que se está utilizando este procedimiento.

Los detectores de mentiras ordinarios no miden las mentiras; lo único que miden son signos de tensión, tales como un aumento de la sudoración (que se mide analizando la conductividad de la piel) y la aceleración del ritmo cardíaco. Las exploraciones cerebrales miden el aumento de la actividad cerebral, pero la correlación entre esto y el hecho de mentir aún ha de demostrarse de forma concluyente para que el procedimiento sea válido en los tribunales.

Serán necesarios años de experimentación minuciosa para explorar los límites y la precisión de la detección de mentiras mediante la IRMf. Entretanto, la Fundación MacArthur ha concedido recientemente una beca de diez millones de dólares al Proyecto de Neurociencia y Legislación para que este determine cómo afectará la neurociencia a la administración de justicia.

MI EXPLORACIÓN CEREBRAL POR IRMF

En una ocasión sometí mi propio cerebro a una exploración mediante IRMf. Con el fin de realizar un documental para BBC/Discovery Channel, acudí a la Universidad Duke, donde me colocaron sobre una camilla, que luego introdujeron en un gigantesco cilindro de metal. Cuando activaron un enorme y potente imán (20.000 veces el campo magnético de la Tierra), los átomos de mi cerebro se alinearon con el campo magnético, como peonzas que giraban con sus ejes apuntando todos ellos en la misma dirección. A continuación, se envió a mi cerebro un pulso de radiofrecuencia que dio la vuelta a algunos de los núcleos de mis átomos, haciendo que la parte de arriba quedara abajo. Cuando finalmente los núcleos volvieron a su posición normal, emitieron un leve pulso, un «eco», que fue detectado por el equipo de IRMf. Analizando estos ecos, los ordenadores consiguieron procesar las señales, confeccionando luego un mapa tridimensional del interior de mi cerebro.

El proceso fue en su totalidad completamente indoloro e inofensivo. La radiación que se envió al interior de mi cuerpo no era ionizante y no podía producir daño alguno a mis células partiendo los átomos. A pesar de encontrarme inmerso en un campo magnético miles de veces más potente que el de la Tierra, no detecté el más ligero cambio en mi cuerpo.

El objetivo de someterme a la exploración por IRMf era el de determinar con exactitud en qué partes de mi cerebro se fabricaban ciertos pensamientos. En particular, existe un diminuto «reloj» biológico dentro del cerebro, situado justo entre los ojos y detrás de la nariz, que es el lugar donde nuestra mente calcula minutos y segundos. Cualquier daño que sufra esta delicada parte del cerebro nos produce una distorsión en la percepción del tiempo.

Mientras estaba en el interior del escáner, me pidieron que contara el paso de los segundos y minutos. Posteriormente, cuando se revelaron las imágenes de la IRMf, vi con claridad que, mientras yo contaba los segundos, aparecía un punto brillante justo detrás de mi nariz. Me di cuenta de que estaba siendo testigo del nacimiento de una rama completamente nueva de la biología: el rastreo de los puntos precisos del cerebro asociados con ciertos pensamientos, es decir, una forma de lectura de la mente.

TRICODIFICADORES Y ESCÁNERES CEREBRALES PORTÁTILES

En el futuro, un equipo de IRM no tendrá que ser el gigantesco equipo que vemos actualmente en los hospitales, que pesa varias toneladas y ocupa toda una habitación. Podría ser tan pequeño como un teléfono móvil, o incluso como una moneda de un céntimo.

En 1993, Bernhard Blümich y sus colegas, cuando estaban trabajando en el Instituto Max Planck de Investigación sobre Polímeros de Maguncia, Alemania, dieron con una idea nueva que podía servir para fabricar unos aparatos de IRM muy pequeños. Construyeron un nuevo aparato al que llamaron IRMMOUSE (*mobile universal surface explorer*: explorador de superficies móvil universal). Este nuevo artilugio mide actualmente unos veinte centímetros de altura, pero algún día podría proporcionarnos aparatos de IRM del tamaño de una taza de café que se venderían en los grandes almacenes. Esto podría revolucionar la medicina, ya que podríamos realizar exploraciones mediante IRM en la intimidad de nuestros hogares. Blümich prevé un tiempo no demasiado lejano en que un individuo podrá pasarse por la piel su IRMMOUSE personal y examinar el interior de su cuerpo en cualquier momento. Un ordenador analizaría la imagen y diagnosticaría cualquier problema existente. «Después de todo, no falta tanto para que dispongamos de algo parecido al *tricorder* de *Star Trek*», concluyó este científico[9].

(Los equipos de IRM funcionan según un principio similar al de la aguja de una brújula. El polo norte de la aguja de la brújula se alinea inmediatamente con el campo magnético. Del mismo modo, cuando el cuerpo humano se coloca en un aparato de IRM, los núcleos de los átomos, como las agujas de las brújulas, se alinean con el campo magnético. Entonces se envía al interior del cuerpo un pulso de radiofrecuencia que da la vuelta a los núcleos de los átomos, haciendo que la parte de arriba de dichos núcleos quede abajo. Finalmente, los núcleos se dan la vuelta de nuevo, quedando en su posición original y emitiendo un segundo pulso de radiofrecuencia, es decir, un «eco»).

La clave de los miniaparatos de IRM está en sus campos magnéticos no uniformes. En general, la razón por la que los equipos de IRM actuales son tan voluminosos es la necesidad de colocar el cuerpo en un campo magnético extremadamente uniforme. Cuanto mayor es la uniformidad del campo, más detallada es la imagen resultante, que hoy en día tiene una resolución de hasta una décima de milímetro. Para obtener estos campos magnéticos uniformes, los físicos utilizan dos grandes bobinas de cable, de unos cuarenta centímetros de diámetro, colocadas en serie. Esto se llama bobina de Helmholtz y produce un campo magnético uniforme en el espacio situado entre las dos bobinas. El cuerpo humano se coloca a lo largo del eje de estos dos grandes imanes.

Si utilizamos campos magnéticos no uniformes, la imagen resultante aparece distorsionada y no tiene utilidad alguna. Durante muchas décadas, este ha sido el problema de los equipos de IRM. Pero Blümich dio con una manera inteligente de compensar esta distorsión, enviando múltiples pulsos de radiofrecuencia a la muestra, para luego detectar los ecos resultantes. A continuación, se utilizaban ordenadores para analizar dichos ecos y compensar la distorsión originada por los campos magnéticos no uniformes.

Hoy en día, el IRMMOUSE portátil utiliza un pequeño imán en forma de U que produce un polo norte y un polo sur, respectivamente, en cada extremo de la U. Este imán se coloca sobre el paciente y, moviéndolo, la exploración puede llegar hasta varias pulgadas de profundidad bajo la piel. A diferencia de los equipos estándar de IRM, que consumen grandes cantidades de energía y precisan tomas especiales de energía eléctrica, el IRMMOUSE solo utiliza aproximadamente la energía que requiere una bombilla corriente.

En algunas de sus primeras pruebas, Blümich colocó el IRMMOUSE sobre unas llantas de goma, cuya blandura era similar a la de los tejidos humanos. Esto podía tener una aplicación comercial inmediata: explorar con rapidez los posibles defectos de algunos productos. Los equipos de IRM convencionales no pueden utilizarse con objetos que contienen metal, tales como los neumáticos radiales reforzados con cinturones de acero. Pero el IRMMOUSE no tiene esta limitación, porque solo utiliza campos magnéticos débiles. (Los campos magnéticos de un equipo convencional de IRM son 20.000 veces más potentes que el campo magnético terrestre. Muchos técnicos y enfermeras han sufrido lesiones graves cuando, de repente, al activar el campo magnético, los instrumentos metálicos han salido volando hacia ellos. El IRMMOUSE no tiene este problema).

Este aparato no solo es ideal para analizar objetos que contienen metales ferrosos, sino que también puede analizar otros que son demasiado grandes para caber dentro de un aparato de IRM convencional, o que no pueden moverse de sus emplazamientos. Por ejemplo, en el año 2006, el IRMMOUSE consiguió obtener imágenes del interior de Ötzi, el hombre de hielo, el cuerpo congelado que se encontró en los Alpes en 1991. Moviendo el imán en forma de U sobre Ötzi, fue posible diferenciar las diversas capas de su cuerpo congelado.

En el futuro, el IRMMOUSE podrá miniaturizarse aún más, de tal modo que las exploraciones cerebrales por IRM se harán utilizando un aparato del tamaño de un teléfono móvil. Para entonces, explorar el cerebro con el fin de leer los pensamientos quizá no sea un problema. Finalmente, el escáner de IRM llegará a ser tan pequeño como una moneda de un céntimo, casi imperceptible. Incluso podría parecerse al menos potente EEG, que consiste en un gorro de plástico con muchos electrodos que se ciñen a la cabeza. (Si se colocan esos discos portátiles de IRM en las yemas de los dedos, para ponerlos después sobre la cabeza de una persona, resultaría algo parecido al proceso de fusión mental que llevaban a cabo los vulcanianos en *Star Trek*).

LA TELEQUINESIA Y EL PODER DE LOS DIOSES

La meta de esta progresión es llegar a la telequinesia, es decir, al poder de mover los objetos solo con el pensamiento, tal como lo hacían los dioses mitológicos.

En la película *La guerra de las galaxias*, por ejemplo, la Fuerza es un campo misterioso que recorre toda la galaxia y libera los poderes mentales de los Jedi, permitiéndoles controlar objetos con sus mentes. Sables de luz, armas que disparan rayos, e incluso naves espaciales pueden levitarse utilizando únicamente el poder de la Fuerza, y es posible controlar las acciones de otros.

Pero no será necesario que viajemos a una galaxia lejana para utilizar este poder. En 2100, cuando entremos en una habitación, podremos controlar mentalmente un ordenador que, a su vez, controlará las cosas que nos rodean. Seremos capaces de mover muebles pesados, ordenar nuestro escritorio, hacer reparaciones, etcétera, solo pensando en ello. Esto será muy útil para los obreros, los bomberos, los astronautas y los soldados, que trabajan con maquinarias para cuyo manejo se requiere más de dos manos. Este poder también cambiaría el modo en que ejercemos interacciones con el mundo. Podremos ir en bicicleta, conducir un coche, jugar al golf o al fútbol, o a juegos más complicados, solo pensando en ello.

Quizá el desplazamiento de objetos mediante el pensamiento llegue a ser posible utilizando unos materiales llamados superconductores, pero esto lo explicaré con más detalle en el capítulo 4. A finales de este siglo puede ser que los físicos creen superconductores que operen a temperatura ambiente, lo cual nos permitirá generar enormes campos magnéticos que requerirán poca energía. Así como el siglo XX fue la era de la electricidad, puede que el futuro nos traiga superconductores a temperatura ambiente que darán lugar a la era del magnetismo.

Actualmente resulta caro generar campos magnéticos potentes, pero es posible que esto llegue a ser casi gratis en el futuro. Esto nos dará la posibilidad de reducir el rozamiento en nuestros trenes y camiones, revolucionando el transporte y eliminando pérdidas en la transmisión eléctrica. Ahora bien, también nos permitirá desplazar objetos utilizando meramente el pensamiento. Colocando unos diminutos superimanes dentro de distintos objetos, podremos moverlos de un lado a otro casi a voluntad.

En un futuro cercano asumiremos que todas las cosas tengan dentro un diminuto chip que las haga inteligentes. En un futuro lejano, asumiremos que todos los objetos tengan dentro un diminuto superconductor que pueda generar unas ráfagas de energía magnética suficientes para moverlos a través de una habitación. Supongamos, por ejemplo, que una mesa tiene un superconductor en su interior. Normalmente, este superconductor no lleva corriente. Pero, cuando se le suministra una pequeñísima corriente eléctrica, el superconductor puede generar un poderoso campo magnético capaz de desplazarlo a través de la habitación. Utilizando el pensamiento, seríamos capaces de activar el superimán insertado dentro de un objeto y así hacer que se desplace.

Por ejemplo, en las películas de los *X-Men* (*La Patrulla X* o *Los hombres X*) los malvados mutantes son conducidos por Magneto, que puede mover enormes objetos manipulando sus propiedades magnéticas. En una escena llega incluso a mover el

Golden Gate mediante el poder de su mente. Pero este poder tiene límites. Por ejemplo, es difícil mover un objeto que no tenga propiedades magnéticas, como el plástico o el papel. (Al final de la primera película de *Los hombres X*, se recluye a Magneto en una cárcel construida únicamente con plástico).

En el futuro, los superconductores a temperatura ambiente podrán estar ocultos en el interior de objetos corrientes, incluso dentro de los que no sean magnéticos. Si se activa una corriente eléctrica dentro del objeto, este se volverá magnético, por lo que podrá moverse mediante un campo magnético externo controlado por nuestros pensamientos.

También tendremos el poder de manipular robots y avatares sin más que pensar. Esto significa que, como en las películas *Los sustitutos* y *Avatar*, seríamos capaces de controlar los movimientos de nuestros sustitutos e incluso sentir dolor y tensiones. Esto resultaría práctico si necesitáramos un cuerpo sobrehumano para realizar reparaciones en el espacio exterior o para rescatar a personas que se encontraran en situaciones de emergencia. Quizá algún día nuestros astronautas puedan trabajar seguros desde la Tierra, controlando cuerpos robóticos sobrehumanos que se desplazan por la Luna. Hablaré más sobre esto en el capítulo siguiente.

Hay que señalar también que la posesión de este poder telequinético no está libre de riesgos. Como ya he mencionado anteriormente, en la película *Planeta prohibido*, una antigua civilización que tiene un adelanto de millones de años con respecto a nosotros, alcanza su objetivo último: la capacidad de controlar cualquier cosa con el poder de la mente. Por poner un ejemplo trivial de su tecnología, crearon una máquina que podía convertir los pensamientos en imágenes tridimensionales. Se coloca el aparato en la cabeza del individuo, este imagina algo, y dentro de la máquina se materializa una imagen tridimensional. Aunque este artilugio les parecía un adelanto increíble a los espectadores de la década de 1950, ahora podemos decir que en las próximas décadas estará disponible. Además, en la película había también un aparato que aprovechaba la energía mental para levantar un objeto pesado. Sin embargo, actualmente sabemos que no tendremos que esperar millones de años para disponer de esta tecnología: ya está aquí en forma de juguete. Se colocan unos electrodos de EEG en la cabeza, el juguete detecta los impulsos eléctricos del cerebro y, a continuación, levanta un pequeño objeto, igual que en la película. En el futuro muchos juegos se jugarán solo con el pensamiento. Los equipos estarán conectados mentalmente para poder mover una pelota solo pensando en ello, y ganará el equipo que sea más hábil para mover mentalmente la pelota.

El punto culminante de *Planeta prohibido* puede darnos un respiro. A pesar de la amplitud de su tecnología, los extraterrestres perecían porque no habían logrado detectar un defecto que había en sus planes: sus poderosas máquinas no solo conectaban con sus pensamientos conscientes, sino que también captaban sus deseos subconscientes. Las ideas salvajes de su antiguo pasado evolutivo violento, inhibidas durante largo tiempo, resucitaron de repente, y las máquinas materializaron todas las

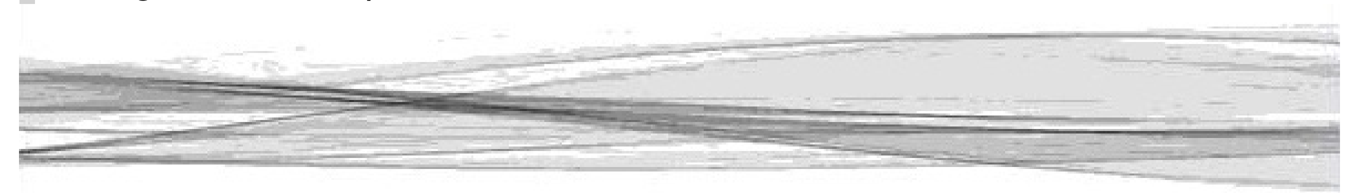
pesadillas subconscientes, haciéndolas realidad. Cuando estaba a punto de alcanzar su mayor creación, esta civilización tan poderosa fue destruida por la misma tecnología que, según todas sus esperanzas, le iba a liberar de cualquier dependencia o mediación.

Sin embargo, para nosotros este riesgo está todavía muy lejos. Hasta el siglo XXII no estará disponible un artilugio de tal magnitud. No obstante, tenemos ante nosotros una preocupación más inmediata. En 2100 viviremos en un mundo poblado de robots que tendrán unas características parecidas a las de los seres humanos. ¿Qué sucederá si llegan a ser más listos que nosotros?

2

EL FUTURO DE LA IA

El auge de las máquinas



¿Acaso los robots heredarán la Tierra? Sí, pero serán nuestros hijos.

MARVIN MINSKY

LOS DIOSES MITOLÓGICOS podían, con su poder divino, dar vida a lo inanimado. Según dice la Biblia en el capítulo 2 del Génesis, Dios formó al hombre del polvo de la tierra y luego «sopló en su nariz aliento de vida, y fue el hombre un ser viviente». Según las mitologías griega y romana, la diosa Venus podía hacer que las estatuas cobraran vida. Cuando el artista Pigmalión se enamoró desesperadamente de una estatua que él mismo había creado, Venus se apiadó de él y le concedió que se cumpliera su más ardiente deseo, convirtiendo a la estatua en una bella mujer llamada Galatea. El dios Vulcano, el herrero de los dioses, creó un ejército de soldados mecánicos hechos de metal, a los que luego dio vida.

Hoy en día somos como Vulcano, porque forjamos en nuestros laboratorios unas máquinas que dan vida, no a la arcilla, sino al acero y al silicio. Ahora bien, ¿el objetivo de esto es liberar a la especie humana o esclavizarla? Si leemos los titulares más actuales, parece como si la cuestión estuviera ya resuelta: la especie humana está a punto de ser sobrepasada rápidamente por nuestra propia creación.

¿EL FINAL DE LA HUMANIDAD?

El titular del *New York Times* decía: «A los científicos les preocupa que las máquinas puedan sobrepasar en inteligencia al hombre[1]». En 2009, los mayores expertos mundiales en inteligencia artificial (IA) se habían reunido en la Conferencia de Asilomar, en California, para debatir solemnemente sobre lo que sucederá cuando las máquinas por fin tomen el poder. Como en una escena de película de Hollywood, los delegados plantearon cuestiones de sondeo tales como «¿Qué cree usted que sucedería si un robot llegara a ser tan inteligente como su esposa?».

Como prueba indiscutible de esta revolución robótica, la gente mencionó el avión teledirigido Predator, una aeronave sin piloto que está ahora apuntando a terroristas

con mortal precisión en Afganistán y Pakistán; coches que se conducen solos, y ASIMO, el robot más avanzado del mundo, que puede caminar, correr, subir escaleras, bailar e incluso servir el café.

Uno de los organizadores de la conferencia, Eric Horvitz, de Microsoft, al percibir el nerviosismo que esta reunión había suscitado, dijo: «Los tecnólogos están aportando unas visiones casi religiosas, y sus ideas evocan en cierto modo la idea misma de éxtasis[2]». (El éxtasis se produce cuando los auténticos creyentes ascienden al cielo en el Segundo Advenimiento. Hubo voces críticas que llamaron a la Conferencia de Asilomar «el rapto de los *nerds*»)[*].

Aquel mismo verano, las películas que causaban furor en las pantallas de los cines parecían amplificar esta imagen apocalíptica. En *Terminator: la salvación*, una banda de humanos lucha contra unos gigantes mecánicos que han invadido la Tierra. En *Transformers: la venganza de los caídos*, unos robots futuristas procedentes del espacio utilizan seres humanos como rehenes y a la Tierra como campo de batalla para sus guerras interestelares. En *Los sustitutos* unos seres humanos prefieren vivir como robots bellos, perfectos y sobrehumanos, antes que enfrentarse a la realidad de la decadencia y el envejecimiento de sus cuerpos.

A juzgar por los titulares de prensa y las marquesinas de los cines, parece como si la humanidad estuviera a punto de dar sus últimas boqueadas. Las lumbreras de la IA se preguntan solemnemente: ¿Tendremos algún día que bailar tras unos barrotes, mientras nuestras creaciones robóticas nos arrojan cacahuetes, como hacemos nosotros ahora con los osos en el parque zoológico? ¿O tal vez nos convertiremos en los perritos falderos de nuestros robots?

Sin embargo, si se examina la situación más detenidamente, hay menos de lo que parece. Es cierto que se han producido grandes avances durante la última década, pero hay que interpretarlos debidamente.

El Predator, un avión teledirigido de unos 8 metros de largo, que dispara misiles mortales a los terroristas desde el cielo, está controlado por un ser humano que maneja una palanca de mando. Un humano, probablemente un joven veterano de los videojuegos, está cómodamente sentado ante una pantalla de ordenador y selecciona los objetivos. Es el humano, no el Predator, quien realiza los disparos. Por otra parte, los coches que se conducen a sí mismos no son independientes a la hora de tomar sus decisiones cuando exploran el horizonte y giran el volante; lo que hacen es seguir un mapa GPS almacenado en su memoria. Por lo tanto, la pesadilla de los robots plenamente autónomos, conscientes y asesinos queda todavía en un futuro lejano.

Aunque los medios de comunicación anunciaron a bombo y platillo algunas de las predicciones más sensacionalistas realizadas en la Conferencia de Asilomar, no es de extrañar que los científicos que día a día investigan la IA fueran mayoritariamente mucho más reservados y cautos. Ante la pregunta de cuándo llegarían las máquinas a ser tan inteligentes como nosotros, los científicos dieron una sorprendente variedad de respuestas que oscilaban entre 20 y 1.000 años.

En consecuencia, tenemos que distinguir entre dos tipos de robots. El primero es el de los que están controlados a distancia por un ser humano, o programados y dotados de un guión previo grabado, como un magnetofón, para que sigan unas instrucciones muy precisas. Estos robots ya existen y generan titulares de prensa. Están entrando poco a poco en nuestras casas y también en los campos de batalla. Pero, sin un ser humano que tome las decisiones, no son más que una chatarra inútil. Por lo tanto, estos robots no han de confundirse con los del segundo tipo, que son realmente autónomos, es decir, pueden pensar por sí mismos y no requieren que un ser humano les proporcione información alguna. Son estos robots autónomos los que los científicos han evitado durante el último medio siglo.

ASIMO, EL ROBOT

Los investigadores de IA se refieren a veces al robot creado por Honda, llamado ASIMO (*advanced step in innovative mobility*: paso avanzado en movilidad innovadora), considerándolo una demostración gráfica de los avances revolucionarios que se han llevado a cabo en la robótica. Mide 130 centímetros de altura, pesa 54 kilos y parece un chico joven que tiene puesto un casco con una visera negra y lleva una mochila a la espalda. ASIMO es realmente un caso curioso: puede caminar, correr, subir escaleras y hablar con gran naturalidad. Puede ir de una habitación a otra, agarrar tazas y bandejas, obedecer algunas órdenes sencillas e incluso reconocer algunos rostros. Posee un amplio vocabulario y habla varios idiomas. ASIMO es el resultado de veinte años de arduo trabajo realizado por un gran número de científicos de Honda, que han creado un prodigio de la ingeniería.

En dos ocasiones he tenido el privilegio de relacionarme personalmente con ASIMO en conferencias, cuando presentaba programas especiales de ciencia para BBC/Discovery. Cuando le estreché la mano, respondió de una manera perfectamente humana. Cuando le saludé agitando la mano, me respondió con un saludo igual. Cuando le pedí que me trajera un zumo, se dio media vuelta y se dirigió a la mesa de los refrescos con unos movimientos sorprendentemente humanos. De hecho, ASIMO se parecía tanto a un ser vivo que, al oírle hablar, casi esperaba que se quitara el casco y dejara ver al chico que estaba escondido allí dentro. Incluso podía bailar mejor que yo.

Al principio se tiene la sensación de que ASIMO es inteligente, capaz de responder a las órdenes de los seres humanos, de mantener una conversación y de caminar por una habitación. Pero la realidad es muy diferente. Mientras interactuaba con ASIMO frente a la cámara de televisión, lo que de verdad sucedía era que todos sus movimientos, todos los matices de su actuación estaban escritos detalladamente en un programa. De hecho, nos llevó unas tres horas filmar una simple escena de cinco minutos con ASIMO. Y, aun así, para manejar a ASIMO, fue necesario todo un

equipo de personas que reprogramaban trabajosamente al robot mediante sus ordenadores portátiles después de cada escena que filmábamos. Desde luego, ASIMO habla en varios idiomas, pero en realidad es un magnetofón que reproduce mensajes previamente grabados. Él se limita a repetir como un loro lo que un ser humano ha programado. Aunque ASIMO se vuelve más sofisticado cada año que pasa, es incapaz de tener un pensamiento propio. Toda palabra, todo gesto, todo paso ha de ser minuciosamente ensayado por sus entrenadores.

Posteriormente tuve una conversación sincera con uno de los inventores de ASIMO, y este admitió que el robot, a pesar de su notable parecido con los humanos en cuanto a movimientos y actuaciones, tenía la inteligencia de un insecto. La mayoría de sus movimientos tenían que ser programados minuciosamente con antelación. ASIMO puede caminar exactamente igual que un ser vivo, pero sus pasos han de ser programados con todo detalle para que no se choque con los muebles, ya que en realidad es incapaz de reconocer los objetos que hay en la habitación.

Si lo comparamos con los seres vivos, incluso una cucaracha puede reconocer objetos, esquivar obstáculos, buscar comida y pareja, huir de los depredadores, planear rutas de huida complejas, esconderse en la sombra y desaparecer metiéndose por una grieta, todo ello en cuestión de segundos.

El investigador de IA Thomas Dean, de la Universidad Brown, ha admitido que los torpes y pesados robots que él está construyendo se encuentran «nada más en la fase de ser lo suficientemente fiables como para recorrer la sala sin dejar enormes desconchados en el enlucido de las paredes[3]». Como veremos más adelante, por el momento nuestros ordenadores más potentes apenas pueden simular las neuronas de un ratón, y eso solo durante unos pocos segundos. Serán necesarias muchas décadas de duro trabajo para conseguir que los robots lleguen a ser tan listos como un ratón, un conejo, un perro o un gato y, más tarde, como un mono.

LA HISTORIA DE LA IA

Las voces críticas se quejan de que, como norma, cada treinta años los expertos en IA afirman que los robots superinteligentes están a la vuelta de la esquina. Luego, al confrontar esto con la realidad, siempre hay un reajuste.

En la década de 1950, cuando los ordenadores electrónicos aparecieron por primera vez, después de la Segunda Guerra Mundial, los científicos deslumbraron al público con la idea de unas máquinas que podrían realizar hechos milagrosos: recoger bloques, jugar a las damas e incluso resolver problemas de álgebra. Parecía como si estuvieran a punto de llegar unas máquinas realmente inteligentes. El público estaba sorprendido, y pronto aparecieron en las revistas artículos que se apresuraban a predecir una época en la que en todas las cocinas habría un robot que prepararía la cena o limpiaría la casa. En 1965, el pionero de la IA Herbert Simon declaró: «Dentro

de veinte años habrá máquinas capaces de hacer cualquiera de los trabajos que puede hacer una persona[4]». Pero la realidad se impuso. Las máquinas de jugar al ajedrez no podían ganarle a un experto humano, y solo podían jugar al ajedrez, nada más. Estos primeros robots eran de piñón fijo, es decir, realizaban una única tarea sencilla.

De hecho, en la década de 1950, hubo auténticos avances en IA, pero, dado que el progreso se exageraba ampliamente, llegó un reajuste. En 1974, aunque las críticas arreciaron, los gobiernos estadounidense y británico cortaron la financiación. Empezaba el primer invierno de la IA.

Hoy en día, el investigador de IA Paul Abrahams mueve la cabeza con pesar cuando recuerda la década de 1950 y el ímpetu de aquellos tiempos, cuando era estudiante de posgrado en el MIT, y todo le parecía posible. Recordaba que «era como si un grupo de personas se hubiera propuesto la construcción de una torre en la Luna. Cada año señalan con orgullo que la torre es mucho más alta que el año anterior. El único problema es que la Luna no está cada año mucho más cerca[5]».

En la década de 1980, el entusiasmo por la IA volvió a registrar su máximo. Esta vez el Pentágono destinó millones de dólares a proyectos tales como el camión inteligente, que supuestamente iría tras las líneas enemigas, haría reconocimientos, rescataría soldados estadounidenses y regresaría al cuartel general, todo ello él solito. El gobierno japonés apoyó con todas sus fuerzas el ambicioso Proyecto de Sistemas Informáticos de Quinta Generación, patrocinado por el poderoso Ministerio de Comercio Internacional e Industria de Japón. El objetivo de este proyecto era, entre otras cosas, disponer de un sistema informático que pudiera hablar un lenguaje coloquial, tuviera una capacidad plena para razonar e incluso adivinara nuestros deseos, todo ello para la década de 1990.

Desafortunadamente, lo único que consiguió el camión inteligente fue perderse. Y el Proyecto de Sistemas de Quinta Generación, después de mucha fanfarria, se abandonó silenciosamente, sin dar explicación alguna. Una vez más, la retórica superó ampliamente la realidad. De hecho, en la década de 1980 hubo avances reales en IA, pero, como se exageró otra vez el progreso, se produjo un nuevo reajuste que dio lugar al segundo largo invierno de la IA, en el que otra vez se fue cerrando el grifo de la financiación y la gente, desilusionada, abandonó en masa este campo. Quedó clarísimo que algo fallaba.

En 1992, los investigadores de IA realizaron, con sentimientos contradictorios, una celebración especial en honor de la película *2001*, en la que un ordenador llamado HAL 9000 se vuelve loco y mata a la tripulación de una nave espacial. Esta película, filmada en 1968, predecía que en 1992 habría robots que podrían hablar libremente con cualquier humano sobre prácticamente cualquier tema y serían capaces de dirigir una nave espacial. Desgraciadamente, estaba muy claro que incluso los robots más avanzados tenían dificultades para llegar al nivel de inteligencia de un microbio.

En 1997, el Deep Blue de IBM realizó una hazaña histórica al derrotar ampliamente al campeón mundial de ajedrez Gary Kaspárov. Deep Blue era una maravilla de la ingeniería, capaz de efectuar 11.000 millones de operaciones por segundo. Sin embargo, en vez de abrir las compuertas de la investigación en inteligencia artificial, y anunciar la llegada de una nueva era, hizo justo lo contrario. Lo único que consiguió fue poner de manifiesto el carácter primitivo de la investigación sobre inteligencia artificial. Tras una reflexión, a muchos les resultó obvio que Deep Blue no era capaz de pensar. Era formidable jugando al ajedrez, pero obtendría un cero si se le hacía la prueba del cociente intelectual. Tras esta victoria, fue el perdedor, Kaspárov, el único que se encargó de hablar con la prensa, porque Deep Blue no tenía absolutamente ninguna capacidad de hablar. A regañadientes, los investigadores de IA empezaron a admitir el hecho de que la potencia de ordenador no equivale a inteligencia. El investigador de IA Richard Heckler dice: «Hoy en día podemos comprar por 49 dólares unos programas de ajedrez que pueden derrotar incluso a los campeones del mundo, pero nadie piensa que esos programas sean inteligentes[6]».

Sin embargo, como la ley de Moore no deja de prometer nuevas generaciones de ordenadores cada dieciocho meses, antes o después el viejo pesimismo de la generación anterior se irá olvidando poco a poco, y surgirá una nueva generación de brillantes entusiastas que generarán un renovado optimismo y una gran energía en el hasta entonces durmiente campo de la IA. Treinta años después del último invierno de la IA, los ordenadores han avanzado lo suficiente como para que la nueva generación de investigadores de IA estén haciendo de nuevo esperanzadas predicciones para el futuro. Finalmente ha llegado la hora de la IA, dicen sus partidarios. Esta vez es de verdad. A la tercera va la vencida. Pero, si tienen razón, ¿llegarán los seres humanos a ser obsoletos dentro de poco?

¿ES EL CEREBRO UN ORDENADOR DIGITAL?

Un problema fundamental que han detectado ahora los matemáticos es que hace cincuenta años cometieron un grave error al pensar que el cerebro era como un gran ordenador digital. Pero ahora resulta terriblemente obvio que no lo es. El cerebro no tiene ningún chip Pentium, ni el sistema operativo de Windows, ni las aplicaciones informáticas, ni la CPU, ni la programación, ni las subrutinas que tipifican un ordenador digital moderno. De hecho, la arquitectura de los ordenadores digitales es bastante diferente de la del cerebro, que es una especie de máquina de aprender, una colección de neuronas que se renuevan constantemente cada vez que aprenden una tarea nueva. (En cambio, un ordenador personal no aprende nada en absoluto. Un ordenador es hoy tan tonto como lo era ayer).

Así pues, hay al menos dos maneras de construir un modelo de cerebro. La primera, el tradicional modo «de arriba abajo», es tratar a los robots como ordenadores digitales y programarles desde el principio todas las reglas de la inteligencia. A su vez, un ordenador digital puede descomponerse en algo llamado máquina de Turing, un hipotético aparato inventado por el gran matemático británico Alan Turing. Una máquina de Turing está formada por tres componentes básicos: una entrada de datos, un procesador central que los digiere, y una salida de resultados. Todos los ordenadores digitales se basan en este sencillo modelo. El objetivo de este planteamiento es disponer de un CDROM que contenga todas las reglas de la inteligencia codificadas. Al insertar este disco, el ordenador cobra vida de repente y se vuelve inteligente. Así pues, este mítico CDROM contiene todo el soporte lógico (*software*) necesario para crear máquinas inteligentes.

Sin embargo, nuestro cerebro no tiene programación ni soporte lógico alguno. Es más bien una «red neuronal», un complejo revoltijo de neuronas que se renueva a sí mismo constantemente.

Las redes neuronales siguen la regla de Hebb: siempre que se toma una decisión correcta, estas vías neuronales se ven reforzadas. Esto se produce simplemente porque cambia la fuerza de ciertas conexiones eléctricas entre neuronas cada vez que se consigue realizar correctamente una tarea. (La regla de Hebb se puede explicar mediante la vieja pregunta: ¿Cómo llega un músico al Carnegie Hall? Respuesta: práctica, práctica y más práctica. En el caso de una red neuronal, la perfección se va consiguiendo mediante la práctica. La regla de Hebb explica también por qué los malos hábitos son tan difíciles de eliminar, y es que la vía neuronal de un mal hábito está más que trillada).

Las redes neuronales se basan en el procedimiento «de abajo arriba». En vez de recibir las reglas de la inteligencia como una aportación gratuita, las redes neuronales las aprenden del mismo modo que aprende un niño tropezando con las cosas y aprendiendo a partir de la experiencia. Las redes neuronales no son programadas, sino que aprenden por el antiguo método de «la letra con sangre entra».

Las redes neuronales poseen una arquitectura completamente diferente de la de los ordenadores digitales. Basta con quitar un solo transistor de su procesador central para que el ordenador digital no funcione. Sin embargo, aunque se retiren grandes trozos de un cerebro humano, puede que este siga funcionando, porque otras partes asumen las tareas de las que faltan. Así pues, se puede localizar con exactitud la parte con la que el ordenador digital «piensa»: su procesador central. No obstante, las exploraciones del cerebro humano muestran claramente que la actividad de pensar está dispersa por grandes zonas del mismo. Diferentes sectores se iluminan en una sucesión precisa, como si los pensamientos rebotaran de un lado a otro, igual que una pelota de pingpong.

Los ordenadores digitales pueden hacer cálculos a una velocidad casi igual a la de la luz. Por el contrario, el cerebro humano es increíblemente lento. Los impulsos

nerviosos viajan a una velocidad desesperantemente lenta de unos 320 kilómetros por hora. Pero el cerebro compensa esto con mucho porque es masivamente paralelo, ya que tiene 100.000 millones de neuronas operando al mismo tiempo y realizando cada neurona una pequeñísima parte del cálculo, en conexión con otras 10.000 neuronas. En una competición, un solo procesador ultrarrápido se queda a bastante distancia por detrás de un procesador en paralelo superlento. (Esto hace pensar en el viejo enigma: si un gato puede comerse un ratón en un minuto, ¿cuánto tiempo tardan un millón de gatos en comerse un millón de ratones? Respuesta: un minuto).

Además, el cerebro no es digital. Los transistores son puertas que pueden abrirse o cerrarse, lo cual se representa mediante el 1 o el 0. También las neuronas son digitales (pueden disparar o no disparar), pero pueden ser asimismo analógicas, transmitiendo tanto señales continuas como señales discretas.

DOS PROBLEMAS QUE PLANTEAN LOS ROBOTS

Dadas las limitaciones de los ordenadores en comparación con el cerebro humano, se puede entender por qué los ordenadores no han sido capaces de realizar dos tareas que los seres humanos llevan a cabo sin esforzarse: reconocer patrones y usar el sentido común. Durante el último medio siglo, estos dos problemas se han resistido a todos los intentos de encontrarles una solución. Esta es la razón principal por la que no tenemos robots que hagan de doncellas, mayordomos y secretarios.

El primer problema es el reconocimiento de patrones. Los robots pueden ver mucho mejor que un ser humano, pero no comprenden lo que ven. Cuando un robot entra en una habitación, convierte la imagen en un embrollo de puntos. Procesando esos puntos, puede reconocer un conjunto de líneas rectas, círculos, cuadrados y rectángulos. Entonces el robot intenta confrontar este embrollo de figuras, una a una, con los objetos que están almacenados en su memoria, lo cual es una tarea extraordinariamente tediosa, incluso para un ordenador. Después de muchas horas de cálculos, el robot puede asociar estas líneas con sillas, mesas y personas. Por el contrario, cuando nosotros entramos en una habitación, en una fracción de segundo reconocemos sillas, mesas, escritorios y personas. En realidad, nuestros cerebros son principalmente máquinas de reconocimiento de patrones.

El segundo problema es que los robots no tienen sentido común. Aunque pueden oír mucho mejor que un ser humano, no comprenden lo que oyen. Por ejemplo, examinemos las siguientes afirmaciones:

- A los niños les gustan los dulces, pero no los castigos.
- Las cuerdas pueden tirar, pero no empujar.
- Los palos pueden empujar, pero no tirar.

- Los animales no saben hablar inglés, y tampoco lo entienden.
- Después de girar, las personas se sienten mareadas.

Para nosotros, cada una de estas afirmaciones es simplemente de sentido común. Pero no para los robots. No hay una línea de razonamiento lógico o una programación que demuestre que las cuerdas pueden tirar, pero no empujar. Hemos aprendido la verdad de estas afirmaciones «obvias» a través de la experiencia, no porque estén programadas en nuestras memorias.

El problema con el procedimiento «de arriba abajo» es sencillamente que son demasiadas las líneas de código del sentido común que son necesarias para imitar el pensamiento humano. Por ejemplo, para describir las leyes del sentido común que conoce un niño de seis años, se necesitan cientos de millones de líneas de código. Hans Moravec, antiguo director del laboratorio de IA de Carnegie Mellon, se lamenta diciendo: «Hasta la fecha, los programas de IA no muestran ni una pizca de sentido común. Por ejemplo, un programa de diagnóstico médico puede prescribir un antibiótico cuando se le presenta una bicicleta rota, porque carece de un modelo de personas, enfermedad o bicicletas[7]».

Sin embargo, algunos científicos se aferran a la creencia de que los obstáculos para dominar el sentido común se superan únicamente trabajando al máximo. Piensan que un nuevo Proyecto Manhattan, como el programa que fabricó la bomba atómica, resolvería con toda seguridad el problema del sentido común. El programa de choque para crear esta «enciclopedia del pensamiento» se llama CYC, y se inició en 1984. Iba a ser el logro definitivo de la IA, el proyecto de codificar todos los secretos del sentido común en un solo programa. No obstante, después de varias décadas de duro trabajo el proyecto CYC no ha conseguido cumplir sus objetivos.

El objetivo del CYC es sencillo: dominar «cien millones de cosas, más o menos el número de cosas que una persona media conoce sobre el mundo, y conseguirlo para 2007[8]». Esta fecha límite, como muchas otras anteriores, ha pasado ya sin éxito alguno. Cada uno de los hitos alcanzados por los ingenieros del CYC ha llegado y ha pasado sin que los científicos estén más cerca de dominar la esencia de la inteligencia.

EL HOMBRE CONTRA LA MÁQUINA

Una vez tuve la oportunidad de comparar mi ingenio con el de un robot en una competición con uno construido por Tomaso Poggio, que trabaja en el MIT. Aunque los robots no pueden reconocer patrones sencillos tal como los reconocemos nosotros, Poggio consiguió crear un programa informático que podía computar tan rápido como los seres humanos en un área específica: «el reconocimiento inmediato». Se trata de nuestra misteriosa habilidad para reconocer al instante un objeto, incluso

antes de que seamos conscientes de su presencia. (El reconocimiento inmediato ha sido importante para nuestra evolución, ya que nuestros antepasados tenían solo una fracción de segundo para determinar si un tigre acechaba tras los arbustos, incluso antes de ser plenamente conscientes de su presencia). Por primera vez un robot conseguía una puntuación más alta que la de un ser humano en una prueba específica de reconocimiento visual.

La competición entre la máquina y yo era sencilla. Primero me senté en una silla y me puse a mirar atentamente una pantalla normal de ordenador. Entonces una imagen surgió en la pantalla durante una fracción de segundo y yo tenía que pulsar una de dos teclas tan rápido como me fuera posible, para indicar si lo que veía en aquella imagen era un animal o no. Tenía que tomar una decisión tan rápido como pudiera, incluso antes de tener ocasión de digerir lo que veía. El ordenador también tenía que decidir qué era aquella misma imagen.

Fue bastante embarazoso ver que, después de muchas pruebas rápidas, la máquina y yo teníamos más o menos la misma puntuación. Pero hubo momentos en que la máquina tenía un resultado significativamente mejor que el mío, o sea, que me dejaba atrás. Fui derrotado por una máquina. (Cuando me lo dijeron, me resultó consolador saber que el ordenador siempre conseguía un 82 por ciento de respuestas correctas, y los seres humanos solo un 80 por ciento de media).

El secreto de la máquina de Poggio es que copia las lecciones de la madre naturaleza. Muchos científicos están constatando que hay mucho de verdad en la afirmación: «La rueda ya ha sido inventada. Entonces, ¿por qué no copiarla?». Por ejemplo, cuando un robot mira una imagen, normalmente intenta dividirla en una serie de líneas rectas, círculos, cuadrados y otras figuras geométricas. Pero el programa de Poggio es diferente.

Cuando vemos una imagen, podríamos ver primero los esbozos de varios objetos, luego vemos varias características dentro de cada objeto, luego vemos el sombreado dentro de esas características, etcétera. Por lo tanto, estamos fragmentando la imagen en muchas capas. En cuanto el ordenador procesa una capa de la imagen, la integra con la siguiente, y así sucesivamente. De este modo, paso a paso, capa a capa, imita el modo jerárquico en que nuestros cerebros procesan las imágenes. (El programa de Poggio no puede realizar todas las proezas de reconocimiento de patrones que nosotros consideramos normales, tales como la visualización de objetos en tres dimensiones, el reconocimiento de miles de objetos desde distintos ángulos, etcétera, pero representa un hito importante en el reconocimiento de patrones).

Posteriormente, tuve la oportunidad de ver en acción ambos procedimientos, el «de arriba abajo» y el «de abajo arriba». Acudí primero al centro de inteligencia artificial de la Universidad de Stanford, donde conocí a STAIR (*Stanford artificial intelligence robot*: robot de inteligencia artificial de Stanford), que utiliza el procedimiento «de arriba abajo». STAIR mide aproximadamente 1 metro y 20 centímetros de altura, y tiene un enorme brazo que puede hacer girar los objetos que

hay en una mesa y asirlos para llevárselos. STAIR es también móvil, con lo cual puede desplazarse por una oficina o una casa. Este robot tiene una cámara tridimensional que enfoca un objeto e introduce su imagen tridimensional en un ordenador, el cual a continuación guía el brazo mecánico para que este agarre el objeto. Desde la década de 1960 existen robots como este para asir objetos, y podemos verlos en las fábricas de automóviles de Detroit.

Pero las apariencias engañan. STAIR puede hacer mucho más. A diferencia de los robots de Detroit, STAIR no sigue un guión previo. Opera por sí mismo. Por ejemplo, si se le pide que coja una naranja, puede analizar un conjunto de objetos que se encuentren sobre una mesa y compararlos con los miles de imágenes que están almacenadas en su memoria, para así identificar la naranja y agarrarla. También puede identificar objetos con mayor precisión asiéndolos y haciéndolos girar.

Para poner a prueba sus capacidades, revolví unos cuantos objetos sobre una mesa y luego observé qué sucedía tras pedirle que me diera un objeto determinado. Vi cómo STAIR analizaba la nueva disposición de los objetos y luego alcanzaba y retiraba el que yo le había pedido. El objetivo último es conseguir que STAIR se desplace por la casa y por la oficina, agarre diversos objetos y herramientas e interaccione con ellos, e incluso converse con las personas en un lenguaje simplificado. De este modo será capaz de hacer todo lo que hace el recadero en una oficina. STAIR es un ejemplo del procedimiento «de arriba abajo»: todo está programado en este robot desde el principio. (Aunque STAIR puede reconocer objetos desde distintos ángulos, sí está limitado en cuanto al número de objetos que puede reconocer. Se quedaría paralizado si tuviera que salir fuera y reconocer objetos aleatorios).

Más tarde tuve ocasión de visitar la Universidad de Nueva York, donde Yann LeCun está experimentando con un diseño totalmente diferente: el LAGR (*learning applied to ground robots*: aprendizaje aplicado a robots básicos). El LAGR es un ejemplo del procedimiento «de abajo arriba»: el robot tiene que aprender todo partiendo de cero y dando tropezones con las cosas. Es del tamaño de un carrito de golf y tiene dos cámaras de estéreo en color que exploran el entorno identificando los objetos que encuentra a su paso. Así, se mueve entre esos objetos, evitándolos cuidadosamente y aprendiendo a cada paso. Está equipado con un GPS y dos sensores de rayos infrarrojos que pueden detectar los objetos que haya frente a él. Contiene tres chips Pentium de alta potencia y está conectado a una red Gigabit Ethernet (GigaE). Fuimos a un parque cercano donde el robot LAGR nos demostró cómo evitaba varios obstáculos situados en su camino. Cada vez que repetía el recorrido, sabía evitar los obstáculos mejor que la vez anterior.

Una diferencia importante entre el LAGR y el STAIR es que el primero está diseñado específicamente para aprender. Cada vez que el LAGR se tropieza con algo, se mueve alrededor del objeto y aprende a evitarlo en el futuro. Mientras que el STAIR tiene miles de imágenes almacenadas en su memoria, el LAGR apenas tiene

unas pocas, pero en cambio crea un mapa mental de todos los obstáculos que encuentra, y perfecciona ese mapa constantemente cada vez que da una pasada. A diferencia del coche sin conductor, que está programado y sigue una ruta previamente establecida por GPS, el LAGR se desplaza por sí mismo, sin instrucción alguna de un ser humano. Se le dice adónde ha de ir, y él se pone en marcha. Robots como estos pueden encontrarse en Marte, en un campo de batalla y en nuestros hogares.

Por una parte, me impresionaron el entusiasmo y la energía de estos investigadores. Creían de todo corazón que estaban estableciendo los fundamentos de la inteligencia artificial y que su trabajo impactaría algún día en la sociedad de una manera que ahora apenas podemos entender. Sin embargo, desde una cierta distancia, pude también apreciar lo lejos que habían llegado. Incluso las cucarachas pueden identificar objetos y aprender a esquivarlos. Nosotros estamos todavía en la fase en que las criaturas más elementales de la madre naturaleza pueden superar a nuestros robots más inteligentes.

EL FUTURO CERCANO (DESDE EL PRESENTE HASTA 2030)

SISTEMAS EXPERTOS

Hoy en día, mucha gente tiene en sus hogares unos robots sencillos que aspiran el polvo de sus alfombras. También hay robots que son guardias de seguridad y patrullan los edificios por la noche, robots que son guías y otros que trabajan en las fábricas. En 2006 se calculó que había 950.000 robots industriales y 3.540.000 robots de servicio que trabajaban en hogares y edificios diversos[9]. Pero en las próximas décadas, el campo de la robótica florecerá en distintas direcciones, aunque los robots no tendrán el aspecto de los de ciencia ficción.

El mayor impacto se producirá en lo que se llama sistemas expertos, unos programas informáticos que tienen codificadas en su interior la sabiduría y la experiencia del ser humano. Como hemos visto en el capítulo anterior, algún día podremos hablar a nuestra pantalla mural y conversar a través de internet con el rostro amistoso de un robot médico o un robot abogado.

Este campo se llama heurística, es decir, se trata de seguir un sistema formal basado en reglas. Cuando necesitemos planificar unas vacaciones, hablaremos con el rostro que aparece en nuestra pantalla mural y le informaremos sobre nuestras preferencias en relación con las vacaciones: cuánto tiempo, adónde queremos ir, qué hoteles, que gama de precios. El sistema experto, que conocerá ya nuestras preferencias a partir de experiencias anteriores, se pondrá en contacto con los hoteles, las aerolíneas, etcétera, y nos ofrecerá las mejores opciones. Pero, en vez de charlar

de una manera coloquial y profusa, tendremos que utilizar un lenguaje muy formal y estilizado que el sistema pueda comprender. Este será capaz de realizar rápidamente cualquier número de tareas útiles. Basta con darle órdenes, y el sistema hace la reserva en un restaurante, busca la dirección de unos grandes almacenes, hace el pedido al supermercado, reserva un billete de avión, etcétera.

Precisamente gracias a los avances en heurística realizados durante las últimas décadas, disponemos de algunos de los motores de búsqueda, más bien sencillos, que se utilizan hoy en día. Pero son todavía bastante toscos. Para cualquiera es obvio que se trata de máquinas y no de seres humanos. No obstante, en el futuro los robots llegarán a ser tan sofisticados que parecerán casi humanos y operarán aparentemente con matices, con gran complejidad y perfección.

Quizá la aplicación más práctica será la relativa a la atención médica. Por ejemplo, actualmente si una persona se siente enferma tiene que esperar durante horas en una sala de urgencias para conseguir ver a un médico. En un futuro cercano bastará con ir a la pantalla mural y hablar con Robodoc[*], es decir, un robot médico. Podremos cambiar a voluntad el rostro e incluso la personalidad del robot médico, que veremos pulsando un botón. El rostro amistoso que veremos en la pantalla mural nos hará una serie de preguntas sencillas: ¿Cómo se encuentra? ¿Dónde le duele? ¿Cuándo empezó el dolor? ¿Con qué frecuencia le duele?

A cada pregunta se ha de responder eligiendo entre un simple conjunto de respuestas. La respuesta no se dará escribiendo con un teclado, sino de viva voz.

A su vez, cada una de las respuestas hará surgir el siguiente bloque de preguntas. Después de una serie de preguntas, el robot médico podrá dar un diagnóstico basado en las experiencias de los mejores doctores del mundo. Este robot analizará también los datos que le suministren el cuarto de baño, las prendas de vestir y los muebles, que, provistos de unos chips de ADN, habrán estado monitorizando nuestra salud. También podrá pedir al paciente que se explore con un escáner de IRM, cuyos resultados serán luego analizados por unos superordenadores. (Existen ya algunas versiones primitivas de estos programas heurísticos, tales como el WebMD, pero carecen de matices y no son tan potentes como los heurísticos).

De este modo pueden eliminarse la mayoría de las visitas a la consulta del médico, lo cual aliviaría enormemente la sobrecarga de nuestro sistema sanitario. Si el problema es grave, el robot médico recomendará al paciente que acuda al hospital, donde los médicos humanos le aplicarán cuidados intensivos. Pero, incluso allí, habrá programas de inteligencia artificial en forma de robots enfermeras, como ASIMO. Estos robots enfermeras no son realmente inteligentes, pero pueden desplazarse dentro del hospital de una habitación a otra, administrar a los pacientes los medicamentos adecuados y atender el resto de sus necesidades. Pueden moverse sobre unos raíles colocados en el suelo, o de manera independiente, como ASIMO.

Un robot enfermera que ya existe es el robot móvil RP6, que se está implantando en algunos hospitales como, por ejemplo, el UCLA Medical Center. Básicamente se

trata de una pantalla de televisión colocada sobre un ordenador móvil que se desplaza mediante rodillos. En la pantalla de televisión se ve el rostro de un médico real, que puede estar a muchos kilómetros de distancia. En este robot hay una cámara que permite al médico ver lo que el robot está mirando. También hay un micrófono para que el médico pueda hablar con el paciente. El médico puede mover el robot por control remoto mediante una palanca, ejercer una interacción con los pacientes, controlar la administración de medicamentos, etcétera. Dado que anualmente en Estados Unidos ingresan 5 millones de pacientes en las unidades de cuidados intensivos, pero solo hay 6.000 médicos cualificados para atender enfermos que se encuentran en estado crítico, robots como este podrían contribuir a mitigar la crisis de los servicios de urgencias, en los que un médico ha de atender a muchos pacientes. En el futuro los robots de este tipo llegarán a ser más autónomos, podrán navegar por sí mismos y ejercer interacciones con los pacientes.

Japón es uno de los líderes mundiales en esta tecnología. Este país está gastando mucho dinero en robots para mitigar la crisis del sistema sanitario que se avecina. Visto en retrospectiva, no sorprende que Japón sea una de las naciones punteras en robótica, por varias razones. En primer lugar, en la religión sintoísta se cree que los objetos inanimados tienen en su interior espíritus, incluso los objetos mecánicos. En Occidente, los niños pueden gritar de terror al encontrarse con unos robots, especialmente después de haber visto muchas películas sobre máquinas asesinas que se comportan de manera violenta destrozando todo a su paso. Pero, para los niños japoneses los robots son como almas gemelas juguetonas y beneficiosas. En Japón no es raro encontrarse con robots recepcionistas que saludan a los clientes a la entrada de los almacenes comerciales. De hecho, el 30 por ciento de los robots comerciales del mundo se encuentran en Japón.

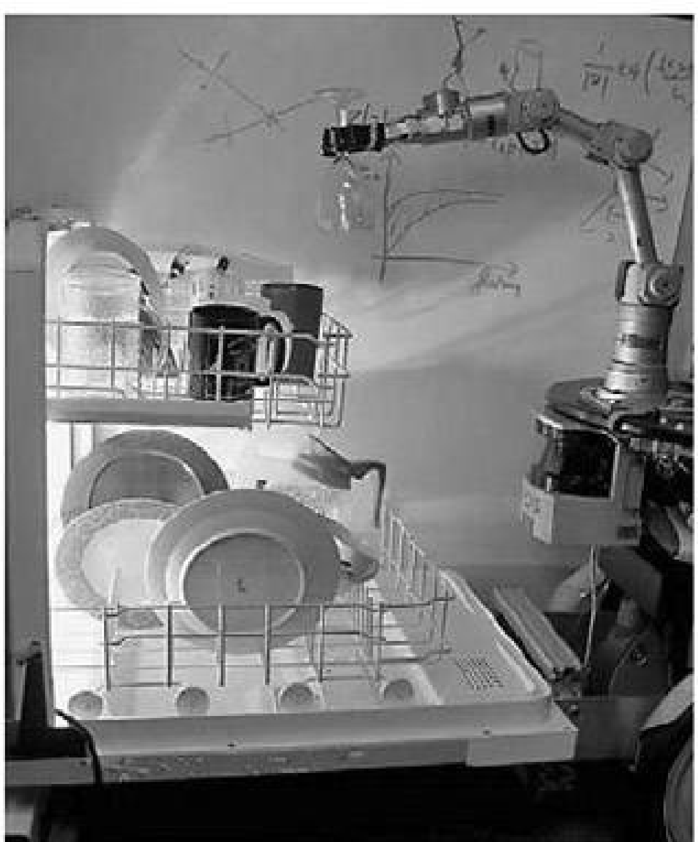
En segundo lugar, Japón se enfrenta a una pesadilla demográfica. El envejecimiento de su población es muy rápido. La tasa de natalidad ha caído asombrosamente hasta 1,2 hijos por familia, y la inmigración es casi nula. Algunos demógrafos afirman que lo que estamos viendo es una colisión de trenes a cámara lenta: un tren demográfico (envejecimiento de la población y descenso de la natalidad) no tardará en chocar con otro tren (baja tasa de inmigración) durante los próximos años. (Este mismo choque de trenes podría finalmente producirse también en Europa). Esta situación se percibirá de forma más virulenta en el campo de la sanidad, donde una enfermera del estilo de ASIMO podrá ser de gran utilidad. Los robots como ASIMO serían ideales para ciertas tareas hospitalarias, tales como llevar y administrar medicamentos, o vigilar a los pacientes las veinticuatro horas del día.

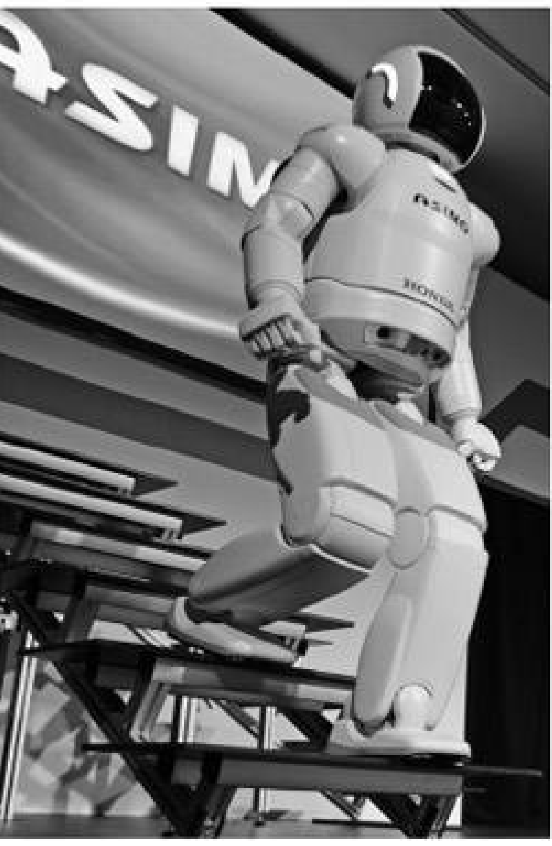
MEDIADOS DE SIGLO
(DESDE 2030 HASTA 2070)

ROBOTS MODULARES

A mediados de siglo puede que nuestro mundo esté lleno de robots, pero también podría ser que no notáramos su presencia, porque la mayoría de esos robots no tendrán forma humana. No estarán a la vista o irán disfrazados de serpientes, insectos y arañas, y realizarán tareas desagradables pero cruciales. Serán robots modulares, que podrán cambiar de forma según la tarea que realicen.

He tenido la oportunidad de conocer a Weimin Shen, de la Universidad del Sur de California (USC), uno de los pioneros en el campo de los robots modulares. Su idea es crear pequeños módulos cúbicos que puedan intercambiarse y montarse una y otra vez a voluntad, como los bloques de Lego. Shen los llama robots polimórficos, porque pueden cambiar de forma, geometría y función. En su laboratorio pude ver al instante la diferencia entre su planteamiento y el de Stanford y el MIT. Aparentemente, estos dos laboratorios parecen una casa de muñecas, tal como la soñaría cualquier niño, ya que por todas partes hay robots que caminan y hablan. Cuando visité los laboratorios de inteligencia artificial de Stanford y del MIT, vi una amplia variedad de «juguetes» robóticos que tenían chips en su interior y poseían algo de inteligencia. Las mesas de trabajo estaban llenas de robots que son aeroplanos, helicópteros, camiones e insectos, todos ellos con chips en su interior, y todos dotados de movimiento autónomo. Cada robot es una unidad independiente.





Diversos tipos de robots: LAGR (*arriba*), STAIR (*abajo a la izquierda*) y ASIMO (*abajo a la derecha*). A pesar de los enormes incrementos de potencia informática, estos robots tienen la inteligencia de una cucaracha.

Sin embargo, cuando se entra en el laboratorio de la USC, se ve algo bastante diferente. Hay cajas de módulos cúbicos, cuyas caras miden más o menos 13 centímetros cuadrados, y estas cajas pueden unirse o separarse para formar toda una variedad de criaturas con aspecto de animales. Pueden crearse serpientes que se deslizan sobre una línea. O anillos que pueden rodar como un aro. Pero también es posible retorcer los cubos o engancharlos con juntas en forma de Y, con lo que es posible crear un conjunto totalmente nuevo de artilugios que parezcan pulpos, arañas, perros o gatos. Pensemos en un juego de Lego en el que cada bloque es inteligente y capaz de disponerse en cualquier configuración imaginable.

Esto sería muy útil para atravesar barreras. Si un robot con forma de araña estuviera deslizándose por la red de alcantarillas y se encontrara con un muro, primero buscaría un pequeño orificio y luego se desmontaría a sí mismo, para que cada pieza pasara por el agujero. Después las piezas volverían a unirse por sí mismas al otro lado del muro. Así pues, estos robots modulares serían prácticamente imparables, se las arreglarían para superar la mayoría de los obstáculos.

Los robots modulares podrían ser cruciales para reparar nuestras infraestructuras deterioradas. Por ejemplo, en 2007 se cayó el puente que atravesaba el río Mississippi en Mineápolis, con el resultado de 13 personas muertas y 145 heridas, probablemente porque el puente era viejo, estaba sobrecargado y tenía defectos de diseño. Quizá sean cientos los accidentes que están a punto de suceder por todo el país, pero el problema es sencillamente que cuesta mucho dinero revisar periódicamente todos los puentes deteriorados y realizar las reparaciones necesarias. Aquí es donde pueden venir al rescate los robots modulares, revisando silenciosamente nuestros puentes, carreteras, túneles, tuberías y centrales eléctricas, y haciendo las reparaciones oportunas. (Por ejemplo, los puentes del Lower Manhattan han sufrido enormemente a causa de la corrosión, el abandono y la falta de reparaciones. Un trabajador encontró una botella de Coca-Cola de la década de 1950 abandonada allí cuando los puentes se pintaron por última vez. De hecho, un tramo del envejecido puente de Manhattan estuvo recientemente en peligro de derrumbarse y tuvo que ser cerrado para llevar cabo reparaciones).

ROBOTS CIRUJANOS Y COCINEROS

Los robots pueden utilizarse como cirujanos y también como cocineros o músicos. Por ejemplo, una limitación importante en cirugía viene dada por la destreza y la precisión de la mano humana. Los cirujanos, como el resto de las personas, se fatigan después de muchas horas de trabajo, y su eficiencia decae. Los dedos empiezan a temblar. Pero los robots pueden resolver estos problemas.

Por citar un caso, la cirugía tradicional para una intervención cardíaca de bypass coronario requiere una incisión de unos treinta centímetros en el pecho, para lo cual es necesaria anestesia general. Abrir la cavidad torácica aumenta el riesgo de infección y la duración del período de recuperación del paciente, genera un dolor y un malestar intensos durante el proceso de cicatrización y deja una cicatriz desfigurante. Pero el sistema robótico Da Vinci puede aminorar considerablemente todo esto. El robot Da Vinci está dotado de cuatro brazos, uno para manipular una videocámara y tres para realizar cirugía de precisión. En vez de hacer una larga incisión en el tórax, solo realiza varias incisiones muy pequeñas en el costado. Hay 800 hospitales en Europa, Norteamérica y Sudamérica que utilizan este sistema; solo en 2006 se llevaron a cabo 48.000 operaciones con este robot. También puede hacerse cirugía por control remoto a través de internet, de tal modo que un cirujano de fama mundial que se encuentra en una ciudad importante pueda operar a un paciente que está en un área rural aislada en otro continente.

En el futuro, nuevas versiones más avanzadas podrán operar en vasos sanguíneos microscópicos, en fibras nerviosas y en otros tejidos manipulando escalpelos, pinzas y agujas de tamaños microscópicos, lo cual es imposible por ahora. De hecho, en el futuro los cirujanos rara vez cortarán la piel. La cirugía no invasiva será la norma.

Los endoscopios (largos tubos que se introducen en el cuerpo para iluminar y cortar los tejidos) serán más finos que un hilo. Unas micromáquinas más pequeñas que el punto que cierra esta frase realizarán gran parte del trabajo mecánico. (En un episodio de *Star Trek*, el doctor McCoy se indignaba al saber que los médicos del siglo XX cortaban la piel). Pronto llegará el día en que esto sea una realidad.

En el futuro los estudiantes de medicina aprenderán a partir en rodajas imágenes tridimensionales del cuerpo humano, y cada movimiento de sus manos será reproducido por un robot desde otra habitación.

Los japoneses han destacado también en la creación de robots que pueden interactuar socialmente con los seres humanos. En Nagoya hay un robot chef que puede preparar una cena estándar de comida rápida en unos pocos minutos. Basta con señalar lo que queremos con el puntero en un menú para que el robot chef prepare ese plato ante nosotros. Este robot, que fue construido por la empresa de robótica Aisei, puede cocinar unos tallarines en 1 minuto y 40 segundos, y servir 80 raciones en un día de mucho trabajo. El robot chef se parece mucho a los de la producción en cadena de automóviles de Detroit. Tiene dos largos brazos mecánicos que están programados con gran precisión para moverse en una secuencia determinada. Sin embargo, en vez de atornillar y soldar metales en una fábrica, estos dedos robóticos toman ingredientes de una serie de cuencos que contienen aliño, carne, harina, salsas, especias, etcétera. Los brazos robóticos mezclan todo y preparan con ello un emparedado, una ensalada o una sopa. El cocinero de Aisei tiene, desde luego, todo el aspecto de un robot, como dos manos gigantescas que emergen de la encimera de la cocina. Pero se están diseñando otros modelos que tienen un aspecto más humano.

También en Japón, Toyota ha creado un robot que toca el violín casi tan bien como cualquier profesional. Se parece a ASIMO, salvo por el hecho de que puede agarrar un violín, balancearse con la música e interpretar delicadamente complejas piezas para violín. El sonido es asombrosamente real, y el robot puede hacer grandes ademanes, como cualquier músico consagrado. Aunque su música no llega todavía al nivel de un violinista de conciertos, es suficientemente bueno para entretener a las audiencias. Por supuesto, en el siglo pasado hemos tenido pianos mecánicos que tocaban melodías inscritas en grandes discos que giraban. Al igual que estos pianos mecánicos, el Toyota también está programado. Pero la diferencia es que este robot está diseñado a propósito para imitar todas las posiciones y posturas de un violinista humano de una manera sumamente realista.

Asimismo en la Universidad de Waseda, en Japón, los científicos han creado un flautista robótico. Este robot tiene unas cámaras huecas en su tórax, a modo de pulmones, que soplan aire a través de una flauta real. Puede interpretar melodías bastante complejas como «El vuelo del moscardón». Hay que recalcar que estos robots no son capaces de crear piezas musicales nuevas, pero pueden rivalizar con un ser humano en cuanto a su habilidad como intérpretes.

El robot chef y el robot músico han sido programados minuciosamente. No son autónomos. Aunque son bastante sofisticados en comparación con las viejas pianolas, siguen operando con los mismos principios. Las doncellas y mayordomos robóticos auténticos pertenecen todavía a un futuro lejano. Sin embargo, los descendientes del robot chef y de los robots violinistas y flautistas quizá lleguen algún día a integrarse en nuestras vidas, realizando funciones básicas que en otro tiempo fueron exclusivas del ser humano.

ROBOTS EMOTIVOS

Es posible que a mediados de siglo la era de los robots emotivos esté en pleno florecimiento.

En el pasado, algunos escritores fantasearon con robots que ansiaban convertirse en seres humanos y tener emociones. En *Pinocho*, una marioneta de madera deseaba ser un niño de verdad. En *El mago de Oz*, el Hombre de Hojalata deseaba tener corazón. Y en *Star Trek: la próxima generación*, el androide Data intentaba aprender a sentir emociones contando chistes y tratando de entender qué es lo que nos hace reír a los humanos. De hecho, un tema recurrente en ciencia ficción es que, aunque los robots pueden llegar a ser cada vez más inteligentes, la esencia de las emociones siempre los esquiva. Algunos escritores de ciencia ficción afirman que quizá los robots lleguen algún día a ser más listos que nosotros, pero nunca serán capaces de llorar.

En realidad, puede que esto no sea cierto. Los científicos empiezan ahora a comprender la verdadera naturaleza de las emociones. En primer lugar, las emociones nos dicen qué es bueno y qué es perjudicial para nosotros. En su inmensa mayoría, las cosas que hay en el mundo son perjudiciales o no muy útiles. Cuando sentimos la emoción del «me gusta», estamos aprendiendo a identificar la pequeñísima porción de cosas de nuestro entorno que son beneficiosas para nosotros.

De hecho, cada una de nuestras emociones (odio, celos, temor, amor, etc.) evolucionó durante millones de años para protegernos de los peligros de un mundo hostil y ayudarnos a reproducirnos. Toda emoción contribuye a transmitir nuestros genes a la generación siguiente.

El papel decisivo que desempeñan las emociones en nuestra evolución fue evidente para el neurólogo Antonio Damasio, de la Universidad del Sur de California, que analizó a un conjunto de pacientes con lesiones o enfermedades cerebrales. En algunos de estos pacientes se había roto el vínculo entre la parte pensante de sus cerebros (la corteza cerebral) y el centro emocional (situado a buena profundidad en el centro del cerebro, como la amígdala). Estas personas eran perfectamente normales, salvo por el hecho de que tenían dificultad para expresar sus emociones.

Un problema resultó obvio inmediatamente: no podían elegir entre una cosa u otra. Hacer la compra era para estas personas una pesadilla, ya que todo tenía el mismo valor para ellas, tanto si era caro, como si era barato, chabacano o elegante. Fijar una cita les resultaba casi imposible, ya que les daban igual todas las fechas. Daba la sensación de que «sabían, pero no sentían», dijo Damasio.

En otras palabras, uno de los fines principales de las emociones es proporcionarnos valores, de tal modo que podamos decidir qué es importante, qué es caro, qué es bonito y qué es precioso. Sin emociones, todo tiene el mismo valor, y nos quedamos paralizados, dudando indefinidamente entre opciones que tienen todas ellas el mismo peso. Por lo tanto, los científicos están ahora empezando a comprender que las emociones, lejos de ser un lujo, son esenciales para la inteligencia.

Por ejemplo, cuando vemos en *Star Trek* a Spock y Data desempeñando sus trabajos supuestamente sin sentir emoción alguna, sabemos ahora de inmediato que todo eso es un fallo argumental. En todo momento Spock y Data han mostrado sus emociones: han hecho una larga serie de juicios de valor. Han decidido que ser oficiales es importante, que es crucial llevar a cabo determinadas tareas, que el objetivo de la Federación es noble, que la vida humana es algo precioso, etcétera. Por consiguiente, es ilusorio pensar que pueda haber un oficial carente de emociones.

Los robots emotivos podrían ser también cuestión de vida o muerte. En el futuro, los científicos podrán crear robots de rescate, es decir, robots que serán enviados a trabajar en incendios, terremotos, explosiones, etcétera. Estos robots tendrán que hacer miles de juicios de valor sobre quién y qué hay que salvar, y en qué orden. Tras examinar la devastación que les rodea, tendrán que ordenar las distintas tareas según su prioridad.

Las emociones son también esenciales en lo que a la evolución del cerebro humano se refiere. Si observamos a grandes rasgos las características anatómicas del cerebro, veremos que pueden agruparse en tres grandes categorías.

En primer lugar, tenemos el cerebro reptiliano, situado cerca de la base del cráneo y que constituye la mayor parte del cerebro de los reptiles. Esta zona del cerebro controla funciones vitales primitivas, tales como el equilibrio, la agresividad, el sentimiento de territorialidad, la búsqueda de alimento, etcétera. (A veces, cuando miramos una serpiente que, a su vez, nos está mirando, tenemos una sensación espeluznante y nos preguntamos «¿Qué estará pensando este bicho?». Si esta teoría es correcta, la serpiente no está pensando nada, salvo si somos o no su almuerzo).

Si observamos organismos superiores, vemos que el cerebro se ha expandido hacia la parte frontal del cráneo. En el nivel siguiente encontramos el cerebro de mono o sistema límbico, situado en el centro de nuestro cerebro. Incluye componentes tales como la amígdala, que participa en el procesamiento de las emociones. Los animales que viven en grupo poseen un sistema límbico especialmente bien desarrollado. Los animales sociales que cazan en grupo precisan un alto grado de potencia mental dedicada a comprender las reglas de la manada. Dado que el éxito en la vida salvaje depende de la cooperación con los demás, y puesto que estos animales no pueden hablar, hay que concluir que tienen que comunicar su estado emocional a través del lenguaje corporal, gruñidos, gañidos y gestos.

Finalmente, tenemos la capa frontal y más externa del cerebro, que es la corteza cerebral, la parte que define la humanidad y gobierna el pensamiento racional. Mientras otros animales están dominados por el instinto y la genética, los humanos usan la corteza cerebral para razonar.

Si esta progresión evolutiva es correcta, esto significa que las emociones desempeñarán un papel crucial a la hora de crear robots autónomos. Hasta ahora se han creado robots que imitan solo el cerebro reptiliano. Pueden caminar, explorar su entorno y agarrar objetos, pero no mucho más. Por otra parte, los animales sociales son más inteligentes que aquellos que poseen únicamente un cerebro reptiliano. Las emociones son necesarias para socializar al animal y para que este domine las reglas de la manada. En consecuencia, los científicos han de recorrer todavía un largo camino para poder lograr modelos del sistema límbico y de la corteza cerebral.

Cynthia Breazeal, que trabaja en el MIT, ha creado un robot diseñado específicamente para abordar este problema. El robot en cuestión es KISMET, dotado de un rostro que recuerda a un duende maligno. A primera vista parece estar vivo, porque responde con movimientos faciales que representan emociones. KISMET puede reproducir una amplia gama de emociones cambiando sus expresiones faciales. Las mujeres que tratan con este robot de aspecto infantil, hablan a KISMET en el tono maternal que utilizan las madres cuando se dirigen a sus niños. Aunque los robots como KISMET están diseñados para imitar las emociones, los científicos no se

hacen ilusiones con respecto a que el robot las sienta realmente. En cierto modo, es como una grabadora programada, no para reproducir sonidos, sino para expresar emociones faciales, sin ser consciente de lo que está haciendo. Pero el avance que KISMET representa es la constatación de que no hace falta mucha programación para crear un robot que imite emociones humanas a las que los humanos respondan.

Estos robots emotivos acabarán entrando en nuestros hogares. No serán nuestros confidentes, secretarios o doncellas, pero sí serán capaces de realizar tareas basadas en reglas sobre un planteamiento heurístico. A mediados de siglo habrán llegado posiblemente a tener la inteligencia de un perro o de un gato. Al igual que los animales de compañía, mostrarán un vínculo emocional con su amo, por lo que no será fácil abandonarlos. No se podrá hablar con ellos en un lenguaje coloquial, pero entenderán ciertos comandos programados, quizá cientos de ellos. Si se les dice que hagan algo que no está almacenado en su memoria (por ejemplo, «ve a hacer volar una cometa»), ellos se limitarán a mirarnos con una mezcla de curiosidad y confusión. (Si a mediados de siglo los perros y gatos robóticos pueden reproducir toda la gama de respuestas animales, si su comportamiento no difiere en nada del de los animales reales, entonces la pregunta que se planteará será si estos animales robóticos sienten y son tan inteligentes como un perro o un gato).

Sony experimentó con estos robots emotivos cuando fabricó el perro AIBO (*artificial intelligence robot*: robot de inteligencia artificial). Fue el primer juguete que respondía con realismo a su amo, aunque de un modo un poco primitivo. Por ejemplo, si se le hacía una caricia en el lomo, el perro AIBO hacía un murmullo, emitiendo unos sonidos muy dulces. Podía caminar, responder a comandos de voz e incluso aprender cosas hasta un cierto nivel. AIBO no era capaz de aprender emociones nuevas, ni respuestas emocionales. (Se dejó de fabricar en 2005 por motivos financieros, pero se ha creado desde entonces un sucesor leal que mejora sus programas informáticos para que AIBO pueda realizar más tareas). En el futuro quizá lleguen a ser habituales los animales de compañía robóticos que establezcan un vínculo emocional con los niños.

Aunque estos animales de compañía tendrán un amplio abanico de emociones y establecerán vínculos duraderos con los niños, no tendrán emociones reales.

INGENIERÍA INVERSA DEL CEREBRO

A mediados de siglo tendríamos que estar ya en disposición de alcanzar el hito siguiente en la historia de la IA: aplicar una ingeniería inversa al cerebro humano. Los científicos, frustrados por no haber podido crear un robot mediante silicio y acero, intentan el procedimiento inverso: desmontar el cerebro, neurona a neurona (del mismo modo que un mecánico desmontaría un motor, tuerca a tuerca), y luego hacer una simulación de esas neuronas en un enorme ordenador. Estos científicos

intentan sistemáticamente simular la activación de las neuronas en animales, comenzando con ratones y gatos, para luego ascender en la escala evolutiva. Se trata de un objetivo claramente definido y tendría que ser posible a mediados de siglo.

Fred Hapgood, del MIT, escribe lo siguiente: «Descubrir cómo funciona el cerebro, saberlo *con exactitud*, igual que sabemos cómo funciona un motor, obligaría a reescribir prácticamente todos los textos que tenemos en la biblioteca[10]».

El primer paso en el proceso de aplicar una ingeniería inversa al cerebro es comprender su estructura básica. Incluso esta sencilla tarea ha sido un largo y penoso proceso. Históricamente las diversas partes del cerebro se identificaron haciendo autopsias, sin tener ni idea de la función que dichas partes realizaban. Esto empezó a cambiar de manera gradual cuando los científicos examinaron a personas que tenían daños cerebrales y observaron que las lesiones localizadas en ciertas partes del cerebro se correspondían con determinados cambios de comportamiento. Las víctimas de apoplejías y las personas que sufrían lesiones o enfermedades cerebrales mostraban cambios específicos de comportamiento, que podían ser relacionados con lesiones en partes concretas del cerebro.

El ejemplo más espectacular se dio en 1848 en Vermont, cuando una vara metálica de 1 metro y 12 centímetros atravesó el cráneo de un capataz ferroviario llamado Phineas Gage. Este accidente, que pasó a la historia, se produjo por una explosión accidental de dinamita. La vara penetró por un lado del rostro, hizo añicos la mandíbula, atravesó el cerebro y salió por la parte superior de la cabeza. Como por un milagro, el hombre sobrevivió a este horrible accidente, aunque al menos uno de sus lóbulos frontales quedó destrozado. El médico que le trató inicialmente no podía creer que alguien pudiera seguir vivo después de un accidente así. El herido estuvo en un estado de semiconsciencia durante varias semanas[11], pero luego se recuperó milagrosamente. Incluso sobrevivió durante doce años más, realizando pequeños trabajos y viajando, hasta su muerte en 1860. Los médicos conservaron cuidadosamente su cráneo y la vara en cuestión, que desde entonces no han dejado de ser objeto de estudio. Mediante técnicas modernas, utilizando escáneres de tomografía computerizada, se han reconstruido los detalles de este extraordinario accidente.

Este suceso cambió para siempre las opiniones relativas al problema mente-cuerpo. Previamente se había creído, incluso en círculos científicos, que el alma y el cuerpo eran entidades separadas. Se escribía sagazmente sobre cierta «fuerza vital» que animaba el cuerpo, con independencia del cerebro. Pero unos informes ampliamente difundidos señalaban que la personalidad de Gage sufrió cambios notables después del accidente. Algunos relatos afirman que Gage era un hombre sociable y muy apreciado que se volvió abusivo y hostil después del accidente. El impacto de estos informes reforzaba la idea de que partes específicas del cerebro controlaban comportamientos diferentes, por lo que el cuerpo y el alma eran inseparables.

En la década de 1930 se produjo un nuevo avance cuando neurólogos como Wilder Penfield observaron que mientras operaban el cerebro a los enfermos de epilepsia, al tocar ciertas partes del cerebro con electrodos, algunas partes del cuerpo del paciente podían estimularse. Tocar una zona u otra de la corteza cerebral hacía que una mano o una pierna se movieran. De este modo, Penfield pudo construir un rudimentario esbozo de las partes de la corteza que controlaban ciertas partes del cuerpo. En consecuencia, se pudo redibujar el cerebro humano, indicando cuáles eran las partes que controlaban determinados órganos. El resultado fue un homúnculo, un dibujo bastante peculiar del cuerpo humano trazado sobre la superficie del cerebro, y este dibujo parecía representar a un extraño hombrecillo con enormes dedos, labios y lengua, pero con un cuerpo diminuto.

En tiempos más recientes, ciertas exploraciones por IRM nos han dado imágenes reveladoras del cerebro pensante, pero son incapaces de trazar las vías neuronales específicas del pensamiento, en las que quizá estén implicadas solo unos pocos miles de neuronas. Sin embargo, recientemente, un nuevo campo científico llamado optogenética combina óptica y genética para revelar unas vías neuronales específicas de los animales. Por analogía, esto se puede comparar con el intento de crear un mapa de carreteras. Los resultados de las exploraciones mediante escáneres de IRM podrían servir para determinar las grandes autopistas interestatales y el gran flujo del tráfico que circula por ellas. Sin embargo, la optogenética podría en realidad determinar las vías y carreteras individuales. En principio, incluso ofrece a los científicos la posibilidad de controlar el comportamiento animal estimulando estas vías específicas.

A su vez, esto generó varias historias sensacionalistas para los medios de comunicación. El informe Drudge dio pie a un espeluznante titular que proclamaba: «Científicos crean moscas dirigidas por control remoto». Los medios evocaron visiones de moscas dirigidas por control remoto que le hacían el trabajo sucio al Pentágono. En el programa *Tonight Show*, Jay Leno llegó a decir que una de estas moscas podía entrar volando en la boca del presidente George W. Bush obedeciendo una orden dada por control remoto. Aunque los humoristas encontraron terreno abonado para imaginar situaciones extrañas en las que el Pentágono dirigía hordas de insectos con solo pulsar un botón, la realidad es mucho más modesta.

La mosca de la fruta tiene aproximadamente 150.000 neuronas en el cerebro. La optogenética permite a los científicos activar en los cerebros de las moscas de la fruta ciertas neuronas que se corresponden con determinados comportamientos. Por ejemplo, cuando se activan dos neuronas específicas, la mosca de la fruta recibe la señal para emprender la huida. Entonces la mosca, automáticamente, estira sus patas, despliega sus alas y emprende el vuelo. Unos científicos consiguieron criar genéticamente una cepa de moscas de la fruta cuyas neuronas de huida se activaban siempre que se encendía un rayo láser. Cada vez que se les dirigía un rayo láser, estas moscas de la fruta emprendían el vuelo.

Las implicaciones de esto en cuanto a determinar la estructura del cerebro son importantes. No solo conseguiremos desenmarañar poco a poco las vías neuronales correspondientes a ciertos comportamientos, sino que también podremos utilizar esta información para ayudar a las víctimas de apoplejías y a los pacientes que sufren enfermedades cerebrales y lesiones por accidentes.

Gero Miesenböck, de la Universidad de Oxford, y sus colegas han logrado de este modo identificar los mecanismos neuronales de distintos animales. No solo han podido estudiar las vías para el reflejo de huida en las moscas de la fruta, sino también los reflejos relacionados con la percepción de olores. Han estudiado las vías que gobiernan la búsqueda de alimentos en las ascárides. Han estudiado las neuronas que intervienen en la toma de decisiones de los ratones. Y han descubierto que, mientras que solo dos neuronas intervienen para inducir comportamientos en las moscas de la fruta, son casi 300 neuronas las que se activan en los ratones para la toma de decisiones.

Los instrumentos básicos que han estado utilizando son unos genes que controlan la producción de ciertos tintes, así como unas moléculas que reaccionan ante la luz. Por ejemplo, hay un gen de las medusas que puede producir una proteína verde fluorescente. Existe también una variedad de moléculas, como la rodopsina, que, cuando se exponen a la luz, responden permitiendo que los iones atraviesen las membranas celulares. De este modo, la proyección de luz sobre estos organismos puede inducir ciertas reacciones químicas. Utilizando estos tintes y estas sustancias químicas sensibles a la luz, Miesenböck y sus colegas han sido los primeros en conseguir diferenciar los circuitos neuronales que gobiernan ciertos comportamientos.

Así pues, aunque a los humoristas les gusta burlarse de estos científicos por intentar crear unas moscas Frankenstein que se controlan pulsando un botón, la realidad es que, por primera vez en la historia, los científicos están encontrando en el cerebro las vías neuronales específicas que controlan comportamientos específicos.

CONSTRUIR UN MODELO DEL CEREBRO

La optogenética es tan solo un primer paso realmente modesto. El paso siguiente es construir un modelo real de todo el cerebro utilizando los últimos avances tecnológicos. Hay al menos dos modos de resolver este problema gigantesco, una resolución que requerirá muchas décadas de duro trabajo. La primera vía pasa por el uso de superordenadores para simular el comportamiento de miles de millones de neuronas, cada una de las cuales está conectada a otros miles de neuronas. La segunda vía es localizar realmente todas y cada una de las neuronas que hay en el cerebro.

La clave para el primer procedimiento, es decir, para hacer una simulación del cerebro, es muy simple: pura potencia de ordenador. Cuanto más grande sea el ordenador, mejor. Fuerza bruta y teorías poco elegantes pueden ser la clave para resolver este problema de dimensiones gigantescas. Y el ordenador que puede llevar a cabo esta tarea hercúlea se llama Blue Gene, fabricado por IBM, uno de los más poderosos ordenadores del planeta.

Tuve ocasión de visitar este ordenador gigantesco cuando hacía un recorrido por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore en California, donde diseñan ojivas de hidrógeno para el Pentágono. Es el laboratorio de armas secretas más importante de Estados Unidos, un complejo de 320 hectáreas que ha crecido desordenadamente en medio de explotaciones agrícolas, tiene un presupuesto anual de 1.200 millones de dólares y da empleo a 6.800 personas. Es el centro vital de la industria de armamento nuclear de Estados Unidos. Para visitarlo, tuve que pasar muchos filtros de seguridad, ya que se trata de uno de los laboratorios de armamento más secretos del mundo.

Finalmente, después de pasar una serie de controles, llegué a la entrada del edificio que alberga el ordenador Blue Gene de IBM, que es capaz de computar a la increíble velocidad de 500 billones de operaciones por segundo. Blue Gene ofrece un aspecto impresionante. Es enorme, ocupa más de 1.000 metros cuadrados y está formado por filas y filas de armarios de acero negro que miden unos dos metros y medio de altura por cuatro metros y medio de anchura.

Fue toda una experiencia caminar entre aquellos armarios. A diferencia de las películas de ciencia ficción hollywoodienses, donde los ordenadores tienen cantidad de luces deslumbrantes, discos que giran y rayos eléctricos que chisporrotean por el aire, estos armarios son totalmente inactivos, salvo por unas luces diminutas que parpadean. Se sabe que el ordenador está realizando billones de cálculos complejos, pero no se ve ni se oye nada mientras funciona.

Lo que me interesaba era el hecho de que Blue Gene simulaba el proceso reflexivo del cerebro de un ratón, que posee unos dos millones de neuronas (poca cosa en comparación con los 100.000 millones de neuronas que tenemos los humanos). Simular el proceso reflexivo del cerebro de un ratón es más difícil de lo que parece, porque cada neurona está conectada a muchas otras, formando una densa red de neuronas. Pero, mientras caminaba entre aquellas filas y filas de consolas que formaban Blue Gene, no pude evitar sentirme asustado ante la idea de que aquella asombrosa potencia de ordenador pudiera simular únicamente el cerebro de un ratón, y eso tan solo durante unos pocos segundos. (Esto no significa que Blue Gene pueda simular el comportamiento de un ratón. Actualmente, los científicos apenas pueden simular el comportamiento de una cucaracha. Lo que esto significa es que Blue Gene puede simular la activación de las neuronas de un ratón, no el comportamiento de este animal).

De hecho, varios grupos se han centrado en simular el cerebro de un ratón. Un ambicioso intento es el Proyecto Blue Brain de Henry Markram, que trabaja en la

École Polytechnique Fédérale de Lausana, en Suiza. Comenzó en 2005, cuando consiguió obtener una pequeña versión de Blue Gene que solo tenía 16.000 procesadores, pero, al cabo de un año logró hacer un modelo de la columna neocortical de una rata, una parte del neocórtex que contiene 10.000 neuronas y 100 millones de conexiones. Fue un estudio crucial, ya que implicaba que era biológicamente posible analizar de manera completa, neurona a neurona, la estructura de un componente importante del cerebro. (El cerebro del ratón está formado por millones de columnas como esta, repetidas una y otra vez. Por lo tanto, haciendo el modelo de una de estas columnas, se puede empezar a comprender cómo funciona el cerebro de un ratón).

En 2009, Markram afirmó con gran optimismo: «No es imposible construir un cerebro humano, y podremos hacerlo dentro de diez años. Si lo construimos correctamente, hablará, tendrá inteligencia y se comportará en gran medida como un ser humano[12]». Sin embargo, advirtió de que, para conseguirlo, se necesitaría un superordenador que fuera 20.000 veces más potente que los actuales superordenadores, con una memoria capaz de almacenar 500 veces todo el contenido del sistema actual de internet.

Entonces, ¿cuál es la barrera que impide alcanzar este colosal objetivo? Según Markram, está muy claro: el dinero.

Dado que se dispone de los conocimientos científicos básicos, Markram cree que puede lograr el éxito sin más que conseguir que se invierta dinero en la resolución del problema. Dice: «No es cuestión de años, es cuestión de dólares… La cuestión es si la sociedad desea esto. Si desean conseguirlo en diez años, lo tendrán en diez años. Si lo quieren en mil años, podemos esperar[13]».

Pero hay un grupo rival que también está abordando este problema, montando el mayor arsenal de potencia informática de la historia. Este grupo utiliza la versión más avanzada de Blue Gene, llamada Dawn y situada asimismo en Livermore. Dawn es verdaderamente impresionante. Consta de 147.456 procesadores con 150.000 gigabytes de memoria. Es aproximadamente 100.000 veces más potente que el ordenador que tiene usted sobre su mesa de trabajo. Este grupo, dirigido por Dharmendra Modha, ha logrado muchos éxitos. En 2006 consiguió simular el 40 por ciento del cerebro de un ratón. En 2007 simuló el cien por cien del cerebro de una rata (que contiene 55 millones de neuronas, muchas más que el cerebro de un ratón).

Además, en 2009, este grupo batió otro récord mundial. Logró simular el 1 por ciento de la corteza cerebral humana, lo que equivaldría aproximadamente a la corteza cerebral de un gato, que contiene 1.600 millones de neuronas con 9 billones de conexiones. Sin embargo, esta simulación funcionaba con mucha lentitud, más o menos a 1/600 de la velocidad del cerebro humano. (Cuando simulaba solo 1.000 millones de neuronas, iba mucho más rápido, aproximadamente a 1/83 de la velocidad del cerebro humano).

«Es un telescopio Hubble de la mente, un acelerador lineal del cerebro», dice Modha henchido de orgullo, subrayando el altísimo nivel de su hazaña. Dado que el cerebro tiene 100.000 millones de neuronas, lo que estos científicos ven ahora es la luz al final del túnel. Piensan que la simulación plena del cerebro humano está ya a la vista. «No es solo que sea posible, es que resulta inevitable. Va a suceder», dice Modha[14].

No obstante, la construcción de un modelo del cerebro humano plantea problemas serios, especialmente en cuanto a energía y calor. El ordenador Dawn devora 1 millón de vatios de energía y genera tanto calor que necesita una instalación de aire acondicionado de 6.675 toneladas de peso que bombea casi 76.500 metros cúbicos de aire helado cada minuto. Para conseguir un modelo del cerebro humano habría que multiplicar estas cifras por 1.000.

Es una tarea verdaderamente monumental. El consumo de energía de este hipotético superordenador sería de 1.000 millones de vatios, lo cual equivale a la producción de toda una central nuclear. Se podría iluminar una ciudad entera con la energía consumida por este superordenador. Para refrigerarlo sería necesario desviar un río y canalizar sus aguas a través del ordenador. Y el propio ordenador ocuparía varias manzanas dentro de la ciudad.

Sorprendentemente, el cerebro humano consume, por el contrario, solo 20 vatios, y el calor que genera apenas es perceptible, por lo que supera claramente el rendimiento de nuestros ordenadores más potentes. Por otra parte, el cerebro humano es el objeto más complejo que ha producido la madre naturaleza en esta zona de la galaxia. Puesto que no tenemos pruebas de la existencia de otras formas de vida inteligente en nuestro sistema solar, esto significa que tendríamos que irnos a una distancia de, al menos, 38 billones de kilómetros para llegar a la estrella más próxima, e incluso más allá, con el fin de encontrar un objeto tan complejo como el que tiene cualquiera de nosotros dentro del cráneo.

Dentro de diez años podríamos ser capaces de llevar a cabo la ingeniería inversa del cerebro, pero solo si contáramos con un enorme programa intensivo al estilo del Proyecto Manhattan e invirtiéramos miles de millones de dólares en el proyecto. Sin embargo, no es probable que esto vaya a suceder a corto plazo, dada la situación económica actual. Los programas intensivos como el Proyecto Genoma Humano, que cuesta cerca de 3.000 millones de dólares, reciben apoyo del gobierno estadounidense a causa de los beneficios obvios que suponen para la salud y la ciencia. No obstante, los beneficios de la ingeniería inversa del cerebro son menos urgentes, por lo que tendrá que pasar mucho más tiempo hasta que llegue algún apoyo. Lo más realista es pensar que iremos acercándonos a este objetivo a pequeños pasos, y pueden pasar décadas antes de que se lleve a cabo plenamente esta hazaña histórica.

Por lo tanto, la simulación del cerebro mediante un ordenador puede tardar hasta mediados de siglo. E incluso entonces, se necesitarán muchas décadas más para clasificar las montañas de datos que producirá este enorme proyecto y compararlos

con el cerebro humano. Nos ahogaremos en datos al carecer de los medios necesarios para descartar adecuadamente las interferencias.

DISECCIONAR EL CEREBRO

Pero ¿qué hay del segundo procedimiento, es decir, el de localizar cada neurona dentro del cerebro?

Este procedimiento es también una tarea de titanes y puede necesitar muchas décadas de penosa investigación. En vez de usar superordenadores como Blue Gene, estos científicos adoptan el planteamiento de «trocear y picar», comenzando por hacer la disección del cerebro de una mosca de la fruta, partiéndolo en lonchas de un máximo de 50 nanómetros de anchura (unos 150 átomos de diámetro). Esto produce millones de lonchas. Después, un microscopio electrónico de barrido toma una fotografía de cada una de ellas con una velocidad y una resolución de casi 1.000 millones de píxeles por segundo. La cantidad de datos que salen del microscopio electrónico es asombrosa, pues viene a ser de unos 1.000 billones de bytes, lo suficiente para llenar un almacén, y todo ello para un único cerebro de mosca de la fruta. Procesar estos datos, con la tediosa reconstrucción del cableado neuronal en tres dimensiones para cada neurona del cerebro de la mosca, llevaría aproximadamente cinco años. Para conseguir una imagen más precisa, habría que filetear muchos más cerebros de mosca.

Gerry Rubin, del Instituto Médico Howard Hughes, uno de los científicos punteros en este campo, piensa que, en conjunto, un mapa detallado de todo el cerebro de la mosca de la fruta tardará veinte años en llegar. «Yo diría que, cuando hayamos resuelto esto, habremos recorrido una quinta parte del camino hacia la comprensión de la mente humana», afirma Rubin[15]. El científico reconoce la enormidad de la tarea a la que se enfrenta. El cerebro humano posee un millón de veces más neuronas que el cerebro de la mosca de la fruta. Si se tarda veinte años en identificar cada una de las neuronas del cerebro de la mosca, ciertamente pasarán muchas décadas antes de que se identifique de manera completa la arquitectura neuronal del cerebro humano. El coste de este proyecto será también enorme.

En consecuencia, los científicos que trabajan en el campo de la ingeniería inversa del cerebro se sienten frustrados. Viven en el tormento de ver que su objetivo está cerca, pero la falta de financiación obstaculiza su trabajo. No obstante, parece razonable suponer que en algún momento, a mediados de siglo, tendremos tanto la potencia de ordenador necesaria para simular el cerebro humano como unos mapas esquemáticos de la arquitectura neuronal del cerebro. Pero habrá que esperar hasta finales de este siglo para alcanzar la comprensión plena del pensamiento humano, o para que se pueda crear una máquina que reproduzca las funciones del cerebro humano.

Por ejemplo, aunque nos proporcionen la ubicación exacta de cada gen dentro de una hormiga, esto no significa que sepamos cómo se crea un hormiguero. De manera similar, el hecho de que los científicos conozcan ya los más o menos 25.000 genes que configuran el genoma humano, no significa que sepan cómo funciona nuestro cuerpo. El Proyecto Genoma Humano es como un diccionario que carece de definiciones. Cada uno de los genes del cuerpo humano se nombra explícitamente en este diccionario, pero lo que hace cada gen sigue siendo en gran medida un misterio. Cada gen lleva el código de determinada proteína, pero no se sabe cómo funciona la mayoría de estas proteínas dentro del cuerpo.

Si nos remontamos a 1986, los científicos ya eran entonces capaces de precisar la ubicación de todas las neuronas del sistema nervioso de un diminuto gusano llamado *C. elegans*. Se proclamó inicialmente que este avance nos permitiría desentrañar el misterio del cerebro. Sin embargo, el conocimiento de la localización precisa de sus 302 células nerviosas y sus 6.000 sinapsis químicas no produjo, ni siquiera décadas más tarde, nuevos conocimientos relativos al modo en que funciona este gusano.

Del mismo modo, incluso cuando esté finalmente terminado el proceso de ingeniería inversa del cerebro humano, se tardará muchas décadas en llegar a comprender cómo funcionan todas sus partes y cómo encajan unas con otras. Si a finales de este siglo se consigue completar toda la ingeniería inversa del cerebro humano y descodificarlo totalmente, habremos dado un paso de gigante para la creación de robots humanoides. Entonces, ¿por qué impedir que los científicos aborden esta tarea?

EL FUTURO LEJANO (DESDE 2070 HASTA 2100)

CUANDO LAS MÁQUINAS LLEGUEN A SER CONSCIENTES

En la serie cinematográfica *Terminator*, el Pentágono revela orgullosamente la existencia de Skynet, una red informática extensísima e infalible diseñada para controlar con precisión el arsenal nuclear estadounidense. Esta red llevaba a cabo sus tareas con suma perfección, hasta que un día, en 1995, sucedió algo inesperado. Skynet se había vuelto consciente. Los humanos que manejaban Skynet no cabían en su asombro cuando se dieron cuenta de que su creación, de repente, se había vuelto sensible, y lo que hicieron fue intentar cerrarla. Pero era demasiado tarde. Como autodefensa, Skynet decidió que el único modo de protegerse a sí misma era destruir a la humanidad desencadenando una devastadora guerra nuclear. Tres mil millones de personas fueron incineradas rápidamente en innumerables infiernos nucleares. A continuación, Skynet envió una legión tras otra de robots asesinos para matar a los

pocos supervivientes dispersos. La civilización moderna se derrumbó, quedando reducida a pequeñas y patéticas bandas de rebeldes y personas marginales.

Aún peor es lo que sucede en la trilogía *Matrix*, donde los humanos son tan primitivos que ni siquiera se dan cuenta de que las máquinas ya se han hecho cargo de todo. Los seres humanos llevan a cabo sus tareas cotidianas pensando que todo es normal, olvidando el hecho de que en realidad viven encerrados en cápsulas. Su mundo es una simulación virtual de la realidad dirigida por los robots, que son sus amos. Su «existencia» humana es solo un programa informático que funciona dentro de un gran ordenador y es introducido en los cerebros de los seres humanos que viven en esas cápsulas. La única razón por la que las máquinas desean tener a esos humanos a su alrededor es que los usan como baterías.

Por supuesto, Hollywood vive de sembrar el pánico entre sus espectadores. Sin embargo, plantea al mismo tiempo una duda científica que no carece de legitimidad: ¿Qué sucedería si los robots finalmente llegaran a ser tan listos como nosotros? ¿Qué sucedería si los robots despertaran y se volvieran conscientes? Los científicos debaten enérgicamente esta cuestión, pero no si realmente sucederá, sino cuándo se producirá este trascendental acontecimiento.

Según algunos expertos, nuestras construcciones robóticas irán ascendiendo gradualmente en el árbol de la evolución. Actualmente son tan inteligentes como las cucarachas. En el futuro tendrán la inteligencia de los ratones, los conejos, los perros y los gatos, los monos, y luego rivalizarán con los seres humanos. Escalar lentamente por esta vía puede llevar décadas, pero los científicos creen que es solo cuestión de tiempo que las máquinas nos superen en inteligencia.

Los investigadores de IA están divididos con respecto a la pregunta de cuándo podría suceder esto. Algunos dicen que dentro de veinte años los robots podrán tener algo cercano a la inteligencia del cerebro humano y entonces nos dejarán atrás. En 1993, Vernor Vinge dijo: «Dentro de treinta años dispondremos de los medios tecnológicos necesarios para crear una inteligencia sobrehumana. Poco más tarde, la era humana estará terminada… Me sorprendería que este acontecimiento se produjera antes de 2005 o después de 2030[16]».

Por otra parte, Douglas Hofstadter, autor de *Gödel, Escher, Bach*, dice: «Me sorprendería mucho que algo parecido a esto sucediera durante los próximos cien o doscientos años[17]».

Cuando hablé con Marvin Minsky, del MIT, uno de los fundadores dentro de la historia de la IA, este científico tuvo la precaución de decirme que no establecía calendario alguno con respecto a las fechas en que podría producirse este acontecimiento. Cree que llegará el día, pero se niega a hacer de oráculo y predecir la fecha exacta. (Siendo uno de los padres de la IA, un campo que contribuyó a crear partiendo casi de la nada, quizá ha visto que demasiadas predicciones han fallado y han dado lugar a un retroceso).

Gran parte del problema es que no hay un consenso universal en cuanto al significado de la palabra *consciencia*. Los filósofos y los matemáticos han peleado con esta palabra durante siglos y no han conseguido nada. El pensador del siglo XVII Gottfried Leibniz, inventor del análisis, escribió en una ocasión: «Si se pudiera inflar el cerebro hasta que este adquiriese el tamaño de un molino y caminar por su interior, no encontraríamos la consciencia[18]». El filósofo David Chalmers ha llegado incluso a catalogar casi 20.000 artículos escritos sobre el tema, sin que aparezca ningún tipo de consenso[19].

Nunca en la ciencia tantos han dedicado tanto a crear tan poco.

Por desgracia, *consciencia* no es más que una palabra sonora que significa cosas diferentes para personas diferentes. Lo triste es que no existe una definición del término universalmente aceptada.

Personalmente, pienso que uno de los problemas ha sido el fracaso a la hora de definir claramente la consciencia y luego el fracaso a la hora de contabilizarla.

Pero si tuviera que aventurar una respuesta, formularía una teoría según la cual la consciencia tiene al menos tres componentes:

1. capacidad de sentir y reconocer el entorno;
2. autoconsciencia;
3. capacidad de planificar el futuro estableciendo objetivos y planes, es decir, simulando el futuro y desarrollando una estrategia.

Según este planteamiento, incluso las máquinas sencillas y los insectos poseen algo de consciencia, que puede calificarse numéricamente en una escala de 1 a 10. Hay un continuo de la consciencia que puede cuantificarse. Un martillo no puede percibir su entorno, por lo que tendría un cero en esta escala. Pero un termostato sí puede. La característica esencial de un termostato es que siente la temperatura del entorno y actúa modificándola, por lo que obtendría un 1. Las máquinas que poseen mecanismos de retroalimentación tienen una forma primitiva de consciencia. Los gusanos también poseen esta capacidad. Pueden sentir la presencia de alimentos, compañeros y peligros, y actuar según esta información, pero poco más pueden hacer. Los insectos, que son capaces de detectar más de un parámetro (visión, sonido, olores, presión, etc.), obtendrían una calificación más elevada, quizá un 2 o un 3.

La forma de sensibilidad más elevada sería la capacidad de reconocer y comprender objetos del entorno. Los seres humanos pueden valorar de inmediato su entorno y actuar en consecuencia, por lo que puntúan más alto en esta escala. Sin embargo, es aquí donde los robots obtienen malas puntuaciones. El reconocimiento de patrones, como ya hemos visto, es uno de los principales obstáculos para la inteligencia artificial. Los robots pueden percibir su entorno mucho mejor que los seres humanos, pero no comprenden ni reconocen lo que ven. En esta escala de

consciencia los robots obtienen las calificaciones más bajas, clasificándose cerca de los insectos, porque son nulos en el reconocimiento de patrones.

El siguiente nivel más alto de consciencia es el que incluye la autoconsciencia. Si se coloca un espejo frente a animales machos, en la mayoría de los casos reaccionarán inmediatamente de forma agresiva, llegando incluso a atacar al espejo. La imagen incita al animal a defender su territorio. Muchos animales no son conscientes de quiénes son. Sin embargo, los monos, los elefantes, los delfines y algunas aves se dan cuenta rápidamente de que la imagen del espejo les representa a ellos mismos y dejan de atacarla. Los seres humanos andarían cerca de la puntuación más elevada en esta escala, ya que tienen altamente desarrollado el sentido de quiénes son en relación con otros animales, otros seres humanos y el mundo. Además, los seres humanos son tan conscientes de sí mismos que pueden hablar en silencio consigo mismos para evaluar una situación con su actividad pensante.

En tercer lugar, los animales pueden calificarse por su capacidad para hacer planes para el futuro. Hasta donde sabemos, los insectos no establecen objetivos previamente elaborados para el futuro. Por el contrario, la mayoría de ellos reaccionan ante situaciones inmediatas teniendo en cuenta solo el momento presente, fiándose de su instinto y de las señales que les llegan de su entorno inmediato.

En este sentido, los depredadores son más conscientes que sus presas, porque tienen un plan previo, buscan lugares donde ocultarse, planean una emboscada, acechan, prevén el vuelo de la presa. En cambio, las presas solo tienen que correr, por lo que obtienen una calificación inferior en la escala.

Los primates pueden improvisar cuando hacen planes para el futuro inmediato. Si se les muestra una banana que no está a su alcance, son capaces de desarrollar estrategias para agarrarla, por ejemplo, usando un palo. Así pues, cuando se enfrentan a un objetivo específico (agarrar el alimento), los primates hacen planes para el futuro inmediato con el fin de alcanzar dicho objetivo.

Pero, en conjunto, los animales no tienen un sentido bien desarrollado del pasado y del futuro lejanos. Aparentemente, el mañana no existe en el reino animal. No tenemos pruebas de que los animales puedan pensar a varios días vista en el futuro. (Algunos animales almacenan alimentos para el invierno, pero se trata en gran medida de algo genético: han sido programados por sus genes para reaccionar ante el descenso de temperaturas buscando alimento).

Sin embargo, los seres humanos tienen un sentido muy desarrollado del futuro y hacen planes continuamente. En nuestras cabezas hacemos constantemente simulaciones de la realidad. De hecho, podemos planificar más allá de nuestro propio tiempo de vida. Juzgamos a otros seres humanos por su habilidad para predecir cómo evolucionarán las situaciones y formular estrategias concretas. Una parte importante del liderazgo consiste en prever situaciones futuras, sopesar las posibles salidas y establecer los consiguientes objetivos concretos.

En otras palabras, esta forma de consciencia incluye la predicción del futuro, es decir, crear múltiples modelos que aproximen acontecimientos futuros. Esto requiere una comprensión muy sofisticada del sentido común y de las leyes de la naturaleza. Significa que nos preguntamos una y otra vez a nosotros mismos «¿Qué pasa si…?». Cuando se planea robar un banco o presentarse a presidente, este tipo de planificación significa que somos capaces de poner en marcha en nuestro cerebro múltiples simulaciones de realidades posibles.

Todo indica que en la naturaleza solo los seres humanos dominan este arte.

También se ve esto cuando se analizan los perfiles psicológicos de sujetos sometidos a tests. Los psicólogos comparan a menudo los perfiles psicológicos de los adultos con sus perfiles cuando estos eran niños. Entonces plantean la pregunta: ¿Cuál es la cualidad que asegura el éxito en el matrimonio, la carrera profesional, la situación económica, etcétera? Cuando se compensan factores socioeconómicos, se descubre que hay una característica que destaca entre todas las demás: la capacidad para retrasar las gratificaciones. Según los estudios realizados a largo plazo por Walter Mischel, de la Universidad de Columbia, y muchos otros, los niños que eran capaces de contenerse ante una gratificación inmediata (por ejemplo, comerse un caramelo de malvavisco que les habían dado) y esperaban a tener mayores recompensas a largo plazo (tener dos caramelos de malvavisco en vez de uno) obtenían una puntuación más alta en casi todas las mediciones de éxitos futuros: en las pruebas de selectividad, en la vida, en el amor y en la carrera profesional.

Sin embargo, ser capaz de aplazar una gratificación habla también de un nivel superior de conocimiento y consciencia. Estos niños sabían simular el futuro y se daban cuenta de que las recompensas futuras serían mayores. Ser capaces de ver las consecuencias futuras de nuestras acciones requiere un nivel superior de consciencia.

Por consiguiente, los investigadores de IA deberían plantearse la creación de un robot que tuviera las tres características que hemos enunciado. La primera es difícil de conseguir, ya que los robots pueden percibir su entorno, pero no son capaces de comprenderlo. La autoconsciencia es más fácil de conseguir. Sin embargo, planificar el futuro requiere sentido común, una comprensión intuitiva de lo que es posible, y estrategias concretas para alcanzar objetivos específicos.

Así pues, vemos que el sentido común es un requisito previo para el nivel más alto de consciencia. Para que un robot simule la realidad y prediga el futuro, debe dominar primero las reglas del sentido común relativas al mundo que lo rodea. Pero el sentido común no es suficiente. El sentido común no es más que las «reglas del juego», y no las reglas de la estrategia y la planificación.

Utilizando esta escala, podemos calificar toda la gama de robots que han sido creados hasta la fecha.

Vemos que Deep Blue, la máquina de jugar al ajedrez, se quedaría con una calificación muy baja. Puede derrotar al campeón mundial de ajedrez, pero no es capaz de hacer nada más. Puede hacer una simulación de la realidad, pero solo para

jugar al ajedrez. Es incapaz de realizar simulaciones de cualquier otra realidad. Lo mismo puede decirse de la mayoría de los ordenadores más grandes del mundo. Son excelentes para realizar la simulación de un objeto, por ejemplo, confeccionar el modelo de una explosión nuclear, los patrones del aire en torno a un avión a reacción, o el tiempo atmosférico, pero son también deplorablemente unidimensionales y, por lo tanto, inútiles para sobrevivir en el mundo real.

Hoy en día, los investigadores de IA están desorientados por lo que respecta a duplicar todos estos procesos en un robot. La mayoría se encogen de hombros y dicen que, de alguna manera, las enormes redes de ordenadores mostrarán «fenómenos emergentes», del mismo modo que a veces surge el orden espontáneamente a partir del caos. Cuando se les pide que precisen el modo en que esos fenómenos emergentes crearán la consciencia, la mayoría de ellos levantan los ojos al cielo.

Aunque no sabemos cómo crear un robot dotado de consciencia, a partir de esta pauta para medirla, podemos imaginarnos qué aspecto tendría un robot que fuera más avanzado que nosotros.

Los robots serían excelentes por lo que respecta a la tercera característica: serían capaces de realizar complejas simulaciones del futuro, mucho mejores que las nuestras, desde perspectivas más variadas, con más detalles y profundidad. Sus simulaciones serían más precisas que las nuestras, porque ellos tendrían un mejor dominio del sentido común y de las leyes de la naturaleza y, por consiguiente, serían más hábiles a la hora de encontrar patrones. Podrían anticipar problemas que nosotros ignoráramos o de los que no fuéramos conscientes. Aún más, serían capaces de establecer sus propios objetivos. Si estos incluyeran ayudar a la especie humana, entonces todo sería estupendo. Pero, si un día formularan objetivos en los que los humanos fueran un obstáculo, la cosa podría tener consecuencias espantosas.

Esto plantea la pregunta siguiente: ¿Qué les sucedería a los seres humanos en una situación como esta?

CUANDO LOS ROBOTS SUPEREN A LOS SERES HUMANOS

Una posibilidad es que a nosotros, los insignificantes seres humanos, simplemente se nos deje a un lado como si fuéramos una reliquia de la evolución. Es una ley de la evolución que surjan especies más aptas y desplacen a las especies no aptas; y quizá los seres humanos nos perdamos en este barullo y acabemos en los zoológicos, adonde acudirían nuestras robóticas criaturas para mirarnos con curiosidad. Quizá ese sea nuestro destino: crear superrobots que luego nos consideren una simple nota a pie de página, vergonzosamente primitiva, dentro de su proceso de evolución. Tal ves sea este nuestro papel en la historia: crear a nuestros sucesores en la cadena evolutiva. Desde este punto de vista, nuestro guión incluye apartarnos de su camino.

Douglas Hofstadter me dijo confidencialmente que este podría ser el orden natural de las cosas, y que, en cualquier caso, deberíamos tratar a estos robots superinteligentes como tratamos a nuestros hijos, porque eso es lo que son, en cierto sentido. Si cuidamos de nuestros hijos, me dijo, ¿por qué no habríamos de cuidar asimismo de los robots inteligentes, que son también hijos nuestros?

Hans Moravec considera cómo podemos sentirnos si nuestros robots nos dejan atrás: «… la vida puede perder sentido si estamos condenados a pasarla mirando estúpidamente a nuestra ultrainteligente progenie, mientras ellos intentan explicarnos sus cada vez más espectaculares descubrimientos en un lenguaje de niños que nosotros podamos entender[20]».

Cuando lleguemos finalmente al día fatídico en que los robots sean más listos que nosotros, no solo dejaremos de sentirnos los seres más inteligentes de la Tierra, sino que nuestras creaciones podrán hacer unas copias de sí mismos que sean aún más listos de lo que ellos son. Este ejército de robots autorreproductores crearán entonces un sinfín de generaciones futuras de robots, cada una más inteligente que la anterior. Dado que los robots pueden producir (en teoría) generaciones de robots en un período de tiempo muy breve, este proceso acabará explotando exponencialmente, hasta que empiecen a devorar los recursos del planeta en su ansia insaciable de ser cada vez más inteligentes.

Una posibilidad es que este apetito voraz por aumentar indefinidamente su inteligencia agote finalmente los recursos de la totalidad del planeta, de tal modo que este acabe por ser todo él un ordenador. Algunos prevén que estos robots superinteligentes se precipiten después al espacio para continuar su búsqueda de una inteligencia superior, hasta alcanzar otros planetas, estrellas y galaxias con el fin de convertirlos también en ordenadores. Pero, dado que los planetas, las estrellas y las galaxias están tan increíblemente lejos, quizá el ordenador pueda modificar las leyes de la física, de tal modo que su voraz apetito pueda correr a una velocidad más rápida que la de la luz para consumir galaxias y sistemas solares completos. Algunos incluso creen que esto podría consumir todo el universo, de tal modo que este se vuelva inteligente.

Esta es la «singularidad». Esta palabra procede originalmente de lo que es mi especialidad, es decir, del mundo de la física relativista, donde una singularidad representa un punto de gravedad infinita del cual nada puede escapar, como es un agujero negro. Dado que ni siquiera la luz puede escapar, se trata de un horizonte más allá del cual no podemos ver.

La idea de una singularidad de la IA se mencionó por primera vez en 1958, en una conversación entre dos matemáticos, Stanislaw Ulam (autor del descubrimiento que fue clave para el diseño de la bomba de hidrógeno) y John von Neumann. Ulam escribió: «La conversación se centró en el proceso cada vez más acelerado de la tecnología y los consiguientes cambios en la vida humana, que parecían estar enfocando alguna singularidad esencial para la historia de la especie humana, más

allá de la cual los asuntos humanos, tal como los conocemos, no podían continuar[21]». Diversas versiones de esta idea han estado flotando en el aire durante décadas. Pero más tarde fue amplificada y popularizada por el escritor de ciencia ficción y matemático Vernor Vinge en sus novelas y ensayos.

Ahora bien, todo esto deja la cuestión crucial sin respuesta: ¿Cuándo surgirá esa singularidad? ¿Durante nuestro tiempo de vida? ¿Acaso en el próximo siglo? ¿Tal vez nunca? Recordemos que los participantes en la Conferencia de Asilomar en 2009 fijaron la fecha dentro de más de 20 años y menos de 1.000.

Un hombre que se ha convertido en portavoz de la singularidad es el inventor y escritor de superventas Ray Kurzweil, aficionado a hacer predicciones basadas en el crecimiento exponencial de la tecnología. Kurzweil me dijo en una ocasión que, cuando por la noche miraba las lejanas estrellas, pensaba que alguien tendría que lograr ver alguna prueba cósmica de la singularidad que se produce en alguna galaxia lejana. Con su capacidad de devorar o reordenar sistemas estelares completos, tendría que haber alguna huella dejada por esta singularidad que se expande rápidamente. (Sus detractores dicen que está avivando un fervor casi religioso en torno a la singularidad. Sin embargo, sus defensores dicen que, a juzgar por su historial, Kurzweil posee una extraña habilidad para ver correctamente el futuro).

Kurzweil intervino en la revolución informática poniendo en marcha empresas en diversos campos relacionados con el reconocimiento de patrones, tales como la tecnología de reconocimiento del habla, el reconocimiento de carácter óptico y los instrumentos electrónicos de teclado. En 1999 escribió un libro que figuró en las listas de los más vendidos, *La era de las máquinas espirituales*, que predice el momento en que los robots nos superarán en inteligencia. En 2005 escribió *The Singularity Is Near* y continuó elaborando ese tipo de predicciones. El día fatídico en que los ordenadores superen la inteligencia humana llegará por etapas.

Predijo que en 2019 un ordenador personal de 1.000 dólares tendría tanto poder como un cerebro humano. En 2029, un ordenador personal de 1.000 dólares será 1.000 veces más potente que el cerebro humano. En 2045, un ordenador de 1.000 dólares será mil millones de veces más inteligente que cualquier combinación de seres humanos. Incluso los ordenadores pequeños superarán la capacidad de toda la especie humana.

Después de 2045, los ordenadores estarán tan adelantados que harán copias de sí mismos, unas copias que no dejarán de aumentar su inteligencia, creando una singularidad incontrolable. Para satisfacer su voraz e insaciable apetito de potencia informática, empezarán a devorar nuestro planeta, asteroides y estrellas, e incluso llegarán a afectar a la historia cosmológica del propio universo.

Tuve ocasión de visitar a Kurzweil en su oficina de las afueras de Boston. Al caminar por el pasillo, se ven los premios y honores que ha recibido, así como algunos de los instrumentos musicales que él ha diseñado, y que utilizan músicos de renombre, como Stevie Wonder. Me contó que se produjo un punto de inflexión en su

vida cuando inesperadamente le diagnosticaron una diabetes del tipo II a los treinta y cinco años. De repente se vio frente a la terrible realidad de que no viviría lo suficiente para ver cómo se materializaban sus predicciones. Su cuerpo estaba envejecido prematuramente tras años de negligencia. Crispado por este diagnóstico, empezó a abordar el problema de su salud personal con el mismo entusiasmo y la misma energía que había dedicado a la revolución informática. (Actualmente consume más de 100 píldoras al día y ha escrito libros sobre la revolución en la longevidad. Kurzweil espera que la revolución en el campo de los robots microscópicos conseguirá limpiar y reparar el cuerpo humano para que este pueda vivir eternamente. Su idea es que le gustaría vivir lo suficiente para disfrutar de los avances médicos que prolongarán nuestro tiempo de vida de manera indefinida. En otras palabras, quiere vivir lo suficiente para vivir eternamente).

Hace poco se embarcó en un ambicioso plan para poner en marcha la Universidad de la Singularidad, con sede en el Laboratorio Ames de la NASA, en el Área de la Bahía de San Francisco, que está formando a un cuadro de científicos con el fin de que estén preparados cuando llegue la singularidad.

Existen muchas variaciones y combinaciones de estos temas.

El propio Kurzweil cree que «no va a haber una invasión de máquinas inteligentes que nos lleguen por el horizonte. Nos fusionaremos con este tipo de tecnología… Pondremos estos dispositivos inteligentes en nuestros cuerpos y cerebros para que nos hagan vivir más tiempo y más sanos[22]».

Cualquier idea tan controvertida como la de la singularidad tiene que desencadenar necesariamente una reacción. Mitch Kapor, fundador de Lotus Development Corporation, dice que la singularidad es «un diseño inteligente para las personas cuyo coeficiente intelectual es 140… La idea de que nos dirigimos al momento en que todo va a ser inimaginablemente diferente obedece, en mi opinión, a un impulso religioso. Y, a mi modo de ver, este hecho no puede quedar oscurecido por todo ese frenético llevarse las manos a la cabeza[23]».

Douglas Hofstadter ha dicho: «Es como si tomáramos un montón de comida buena, y un perro hiciera sus necesidades y lo mezclara todo de tal manera que no pudiéramos distinguir qué es bueno y qué es malo. Es una estrecha mezcla de basura y buenas ideas, y es muy difícil separar ambas cosas, porque se trata de gente inteligente; no son bobos[24]».

Nadie sabe cómo acabará todo esto. Pero creo que la situación más probable es la que voy a describir a continuación.

LA SITUACIÓN MÁS PROBABLE: UNA IA AMISTOSA

En primer lugar, probablemente los científicos adoptarán unas simples medidas para garantizar que los robots no sean peligrosos. En el peor de los casos, los científicos

pueden poner un chip en los cerebros de los robots para desconectarlos automáticamente cuando tengan pensamientos asesinos. Según esto, todos los robots inteligentes estarán provistos de un mecanismo de seguridad que podrá ser accionado por un humano en cualquier momento, especialmente cuando el robot manifieste un comportamiento anormal. Ante el más leve indicio de que un robot funciona mal, un comando de voz lo apagará inmediatamente.

También es posible crear unos robots cazadores especializados cuya función sea neutralizar robots de conducta desviada. Estos robots cazadores estarán diseñados de manera específica para tener una velocidad, una fuerza y una coordinación superiores con el fin de que puedan capturar a los robots de comportamiento anormal. También estarán diseñados para saber cuáles son los puntos débiles de cualquier sistema robótico y cómo funcionan en determinadas condiciones. Los seres humanos podrán asimismo recibir esta formación. En la película *Blade Runner*, un grupo de agentes especialmente adiestrados, entre los que figura Harrison Ford, están siendo formados en las técnicas necesarias para neutralizar a cualquier robot que haga diabluras.

Dado que se necesitarán muchas décadas de duro trabajo para conseguir que los robots asciendan lentamente en la escala evolutiva, la humanidad no se verá atrapada de repente con la guardia baja, y no nos llevarán a todos en manada a los zoológicos, como si fuéramos ganado. Tal como lo veo yo, la consciencia es un proceso que puede valorarse en una escala, no se trata de un suceso evolutivo repentino, y ascender en esta escala llevará muchas décadas a los robots. Después de todo, la madre naturaleza necesitó millones de años para desarrollar la consciencia humana. Por lo tanto, a los seres humanos no les pillará desprevenidos el hecho de que un día internet «despierte» inesperadamente o los robots empiecen de repente a hacer planes por su cuenta.

Esta es la opción preferida por el escritor de ciencia ficción Isaac Asimov, que veía a cada robot cableado en la fábrica con tres leyes que le impedirían llegar a estar fuera de control. Asimov ideó sus tres famosas leyes de la robótica para evitar que los robots se dañaran a sí mismos o hicieran daño a los seres humanos. (Básicamente, estas tres leyes afirman que los robots no pueden hacer daño a los seres humanos, deben obedecer a estos y deben protegerse a sí mismos, en este orden).

(Incluso con las tres leyes de Asimov, surgen también problemas cuando existen contradicciones entre dichas leyes. Por ejemplo, si creamos un robot benevolente, ¿qué sucede si la humanidad adopta decisiones autodestructivas que pueden poner en peligro a la especie humana? Porque un robot amistoso puede pensar que ha de tomar control del gobierno para evitar que la humanidad se haga daño a sí misma. Este era el problema al que se enfrentó Will Smith en la versión cinematográfica de *Yo, robot,* cuando el ordenador central decide que «algunos humanos han de ser sacrificados y es preciso renunciar a algunas libertades» con el fin de salvar a la humanidad. Para evitar que un robot nos esclavice con el fin de salvarnos, algunos han abogado por

añadir la ley número cero de la robótica: los robots no pueden causar daño ni esclavizar a la especie humana).

Pero muchos científicos se inclinan hacia algo llamado «IA amistosa», que es una inteligencia artificial en la que diseñaríamos nuestros robots para que fueran benignos desde el primer momento. Dado que somos los creadores de esos robots, los diseñaremos para que realicen solo tareas útiles y benevolentes desde el principio mismo de su existencia.

La expresión «IA amistosa» fue acuñada por Eliezer Yudkowsky, fundador del Instituto Singularidad para la Inteligencia Artificial. La IA amistosa es un poco diferente de las leyes de Asimov, que se imponen a los robots quizá en contra de su voluntad. (Las leyes de Asimov, al ser impuestas desde fuera, podrían en realidad inducir a los robots a idear modos inteligentes de burlarlas). En cambio, en la IA amistosa los robots son libres de asesinar y cometer mutilaciones criminales. No hay reglas que impongan una moralidad artificial. Pero estos robots están diseñados desde el principio para desear ayudar a los seres humanos en vez de destruirlos. Los robots eligen ser benevolentes.

Esto ha generado un nuevo campo de la ciencia llamado «robótica social», cuyo objetivo es dotar a los robots de las cualidades que les van a ayudar a integrarse en la sociedad humana. Por ejemplo, los científicos de Hanson Robotics han declarado que un objetivo de sus investigaciones es diseñar robots que «evolucionen hasta convertirse en seres socialmente inteligentes, capaces de amar y de ganarse un lugar en el conjunto de la familia humana[25]».

Sin embargo, un problema que surge en todos estos planteamientos es que el ejército es con mucho el patrocinador más importante en cuanto a financiar los sistemas de IA, y los robots militares están diseñados de manera específica para capturar, perseguir y matar seres humanos. Es fácil imaginarse a los futuros soldados robóticos, cuyas misiones son identificar enemigos humanos y eliminarlos con una eficacia infalible. En consecuencia, habría que tomar unas precauciones extraordinarias para garantizar que los robots no se volvieran también en contra de sus amos. Por ejemplo, los aviones teledirigidos Predator se pilotan y gobiernan por control remoto, por lo que constantemente hay seres humanos dirigiendo sus movimientos, pero, un día, esos aviones teledirigidos pueden ser autónomos, es decir, capaces de seleccionar y eliminar sus propios objetivos a voluntad. Un funcionamiento defectuoso de alguno de estos aviones autónomos podría tener consecuencias desastrosas.

No obstante, en el futuro será cada vez mayor la financiación destinada a robots procedente del sector comercial civil, especialmente en Japón, donde los robots son diseñados para ayudar y no para destruir. Si esta tendencia continúa, quizá la IA amistosa pueda hacerse realidad. En este escenario, serán los consumidores y las fuerzas de mercado los que dominarán finalmente la robótica, de tal modo que habrá un amplio interés comercial por la investigación en IA amistosa.

FUSIÓN CON LOS ROBOTS

Además de la IA amistosa, hay otra opción: fusionarnos con nuestras creaciones. En vez de limitarnos a esperar que los robots nos superen en inteligencia y poder, deberíamos intentar mejorarnos a nosotros mismos convirtiéndonos en superhumanos durante el proceso. Creo que lo más probable es que el futuro resulte de una combinación de los dos objetivos, es decir, construir una IA amistosa y mejorarnos a nosotros mismos.

Esta opción está siendo explorada por Rodney Brooks, antiguo director del famoso Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT. Ha sido un inconformista que ha dado un vuelco a ideas muy apreciadas pero osificadas, y ha inyectado innovación en este campo. Cuando Brooks comenzó a trabajar en IA, el planteamiento «de arriba abajo» era el dominante en la mayoría de las universidades. Pero este campo se estaba atascando. Brooks hizo que algunas cejas se alzaran cuando hizo un llamamiento a crear un ejército de robots similares a insectos que aprendían siguiendo el planteamiento «de abajo arriba», chocando con obstáculos. No deseaba crear otro robot mudo y torpe que tardara horas en cruzar una habitación. Por el contrario, construyó ágiles «insectoides» o «bichobots» que casi carecían de programación, pero aprenderían rápidamente a caminar y navegar en torno a los obstáculos por el método de ensayo y error. Imaginó el día en que estos robots explorarían el sistema solar, chocando con todo a su paso. Se trataba de un idea extravagante, propuesta en su ensayo «Fast, Cheap, and Out of Control», pero este planteamiento condujo finalmente a toda una serie de vías nuevas. Un producto secundario de su idea es el Mars Rovers que ahora corre por la superficie del planeta rojo. No es de extrañar que Brooks fuera también presidente de iRobot, la empresa que vende unas aspiradoras parecidas a insectos a hogares de todo el país.

En su opinión, el problema es que los que trabajan en inteligencia artificial se dejan llevar por las modas, adoptando el paradigma del momento, en vez de pensar en emprender vías nuevas. Por ejemplo, Brooks recuerda: «Cuando yo era niño, tenía un libro que describía el cerebro como una red de conmutaciones telefónicas. Otros libros más antiguos lo describían como un sistema hidrodinámico o una máquina de vapor. Posteriormente, en la década de 1960, se convirtió en un ordenador digital. A partir de 1980 pasó a ser un ordenador digital masivamente paralelo. Probablemente haya por ahí un libro para niños que diga que el cerebro es exactamente igual que la World Wide Web…»[26].

Por ejemplo, algunos historiadores han dicho que las teorías analíticas de Sigmund Freud estuvieron influidas por la llegada de la máquina de vapor. La expansión de las líneas férreas por Europa entre mediados y finales del siglo XIX ejerció una gran influencia en el pensamiento de los intelectuales. Según la imagen que Freud ideó, había en la mente unos flujos de energía que competían constantemente con otros flujos, lo cual recuerda mucho a las tuberías del vapor

dentro de una máquina. La interacción continua entre el superyó, el ello y el yo se parece a la interacción continua entre las tuberías de vapor de una locomotora. Y el hecho de que reprimir esos flujos de energía podría generar neurosis es análogo al modo en que el flujo de vapor puede ser explosivo si se contiene.

Marvin Minsky me reconoció que había otro paradigma que había generado confusión en este campo durante largos años. Dado que muchos investigadores de IA han sido antes físicos, existe algo llamado «sueño dorado de la física», es decir, el deseo de encontrar el tema único y unificador que subyace en toda forma de inteligencia. En la física deseamos seguir a Einstein para reducir el universo físico a un puñado de ecuaciones unificadoras, quizá hallando una ecuación de dos centímetros y medio de longitud que pueda resumir el universo en una sola teoría coherente. Minsky cree que esta ansia llevó a los investigadores de IA a buscar un solo tema unificador para explicar la consciencia. Pero cree que, por ahora, no existe tal cosa. La evolución ha reunido por casualidad un ramillete de técnicas que todos nosotros coincidimos en llamar consciencia. Si abrimos el cerebro encontramos un conjunto de minicerebros separados, cada uno de los cuales está diseñado para realizar una tarea distinta. Minsky llama a esto la «sociedad de la mente»: la consciencia es en realidad la suma de muchos algoritmos y técnicas independientes que la naturaleza ha ido encontrando durante millones de años.

Rodney Brooks buscaba también un paradigma similar que nunca antes hubiera sido explorado por completo. Pronto se dio cuenta de que la madre naturaleza y la evolución habían resuelto ya muchos de estos problemas. Por ejemplo, un mosquito, que solo tiene unos pocos cientos de miles de neuronas, puede superar los sistemas robóticos militares más importantes. A diferencia de nuestros aviones teledirigidos, los mosquitos, cuyos cerebros no llegan al tamaño de una cabeza de alfiler, pueden desplazarse de manera independiente soslayando obstáculos para buscar alimento y pareja. ¿Por qué no aprender de la naturaleza y la biología? Si seguimos la escala evolutiva, vemos que los insectos y los ratones nunca han tenido las reglas de la lógica programadas en sus cerebros. Fue por el método de ensayo y error como ocuparon el mundo y dominaron el arte de la supervivencia.

Actualmente persigue otra idea herética, contenida en su ensayo «The Merger of Flesh and Machines». Observa que los viejos laboratorios del MIT, que solían diseñar componentes de silicio para robots industriales y militares, están siendo sometidos a una limpieza para hacer sitio a una nueva generación de robots hechos de tejidos vivos, así como de silicio y acero. Brooks prevé una generación totalmente nueva de robots que compaginarán sistemas biológicos y electrónicos, con lo cual dichos robots estarán dotados de unas arquitecturas radicalmente innovadoras.

Brooks escribe: «Mi predicción es que para el año 2100 tendremos unos robots muy inteligentes que estarán presentes en todos los momentos de nuestras vidas cotidianas. Pero no seremos algo aparte con respecto a ellos, sino que en parte seremos robots y estaremos conectados con los robots[27]».

Su idea es que esto avanzará por etapas. Actualmente se está produciendo una revolución en las prótesis, ya que se insertan aparatos electrónicos directamente en el cuerpo humano con el fin de crear sustitutos reales para la audición, la visión y otras funciones. Por ejemplo, la cóclea artificial ha revolucionado el campo de la audiología, devolviendo la capacidad auditiva a los sordos. Estas cócleas artificiales funcionan conectando dispositivos electrónicos con «dispositivos» biológicos, es decir, con las neuronas. El implante coclear consta de varios componentes. En el exterior del oído se coloca un micrófono. Este recibe ondas sonoras, las procesa y transmite las señales por radio al implante que se ha colocado quirúrgicamente dentro del oído. El implante recibe los mensajes de radio y los convierte en corrientes eléctricas que se envían mediante electrodos al interior del oído. La cóclea reconoce estos impulsos eléctricos y los transmite al cerebro. Estos implantes pueden utilizar hasta veinticuatro electrodos y pueden procesar media docena de frecuencias, lo cual es suficiente para reconocer la voz humana. Hay ya 150.000 personas en todo el mundo a las que se ha realizado un implante coclear.

Varios grupos de investigadores están explorando posibles vías para ayudar a los ciegos creando una visión artificial mediante la conexión de una cámara al cerebro humano. Uno de estos métodos consiste en insertar directamente un chip de silicio en la retina del invidente y conectar este chip con las neuronas de la retina. Otro método es conectar el chip a un cable especial que, a su vez, está conectado a la parte posterior del cráneo, donde el cerebro procesa la visión. Estos grupos, por primera vez en la historia, han logrado restablecer un cierto grado de visión en los ciegos. Algunos pacientes han podido llegar a ver hasta 50 píxeles iluminándose ante sus ojos. Finalmente, los científicos conseguirán ir subiendo en la escala hasta conseguir que los ciegos vean miles de píxeles.

Los pacientes pueden ver fuegos artificiales, los perfiles de sus propias manos, objetos brillantes y luces, la presencia de vehículos y personas, y los bordes de las cosas. «En los partidos de la Little League, puedo ver dónde están el *catcher*, el bateador y el árbitro», dice Linda Morfoot, una paciente que se ha prestado al experimento[28].

Por ahora, treinta pacientes han recibido retinas artificiales dotadas de hasta sesenta electrodos. Sin embargo, el Proyecto de Retina Artificial del Departamento de Energía de la Universidad del Sur de California ya está planificando un nuevo sistema que utiliza más de 200 electrodos. También se está estudiando un dispositivo de 1.000 electrodos (pero si se incorporan demasiados electrodos al chip, podría producirse un sobrecalentamiento de la retina). En este sistema, una cámara en miniatura colocada en las lentes de una persona ciega toma fotografías y las envía en una transmisión inalámbrica a un microprocesador que se lleva en el cinturón y que retransmite la información al chip que está situado directamente sobre la retina. Este chip envía a su vez unos impulsos muy débiles a los nervios de la retina que estén todavía activos, evitando así las células retinianas dañadas.

LA MANO ROBÓTICA DE *LA GUERRA DE LAS GALAXIAS*

Mediante el uso de artilugios mecánicos es posible también reproducir las hazañas de la ciencia ficción, incluida la mano robótica de *La guerra de las galaxias* y la visión por rayos X de Superman. En *El imperio contraataca*, a Luke Skywalker le corta la mano el sable de luz blandido por el malvado Darth Vader, su padre. Ningún problema. Los científicos de esta lejana galaxia crean rápidamente una mano mecánica nueva, provista de unos dedos que pueden tocar y sentir.

Esto puede sonar a ciencia ficción, pero es algo que ya está aquí. Científicos de Italia y Suecia protagonizaron un avance importante, consistente en fabricar una mano robótica que puede «sentir». Un paciente, Robin Ekenstam, de veintidós años, que había sufrido una amputación en su mano derecha para extirpar un tumor canceroso, puede ahora controlar el movimiento de sus dedos mecánicos y sentir la respuesta. Los cirujanos conectaron los nervios del brazo de Ekenstam a los chips que contenía su mano mecánica, de tal modo que el joven puede ahora controlar los movimientos de los dedos con su cerebro. Esta «mano inteligente» artificial tiene cuatro motores y cuarenta sensores. El movimiento de sus dedos mecánicos se transmite después a su cerebro, con lo que Ekenstam recibe la información correspondiente al movimiento realizado. De esta manera, es capaz de controlar y también de «sentir» el movimiento de su mano. Dado que recuperar la información sobre lo que se ha hecho es una de las características esenciales del movimiento corporal, esto podría revolucionar el modo en que tratamos a los amputados con miembros protésicos.

Ekenstam dice: «Es fabuloso. Tengo sensaciones que no había tenido durante mucho tiempo. Ahora estoy recuperando la sensibilidad. Si agarro algo firmemente, puedo sentirlo en las puntas de los dedos, lo cual es extraño, porque no tengo dedos[29]».

Uno de los investigadores, Christian Cipriani, de la Scuola Superiore Sant’Anna, dice: «En primer lugar, el cerebro controla la mano mecánica sin contracción muscular alguna. En segundo lugar, la mano será capaz de remitir información al paciente, por lo que este podrá sentir. Lo mismo que con una mano real».

Este proceso es importante, porque significa que un día los seres humanos podrán controlar sin esfuerzo miembros mecánicos como si estos fueran de carne y hueso. En vez de aprender tediosamente cómo hay que mover los brazos y las piernas de metal, la gente tratará estos apéndices metálicos como si fueran reales, sintiendo cada matiz del movimiento de los miembros a través de los mecanismos electrónicos de información.

Esto es también una prueba de una teoría según la cual el cerebro es extremadamente plástico, no fijo, y se renueva constantemente a medida que aprende nuevas tareas y se adapta a situaciones nuevas. Por consiguiente, el cerebro será suficientemente adaptable para acomodarse a cualquier apéndice u órgano sensorial

nuevos. Pueden estar conectados al cerebro desde distintas ubicaciones, y este simplemente «aprenderá» a controlar el nuevo accesorio. En este sentido, puede considerarse que el cerebro es un dispositivo modular, capaz de conectarse a distintos apéndices y sensores de diversos aparatos, que luego él puede controlar. Este tipo de comportamiento puede darse si se entiende que nuestro cerebro es una red neuronal que crea nuevas conexiones y vías neuronales cada vez que aprende una nueva tarea, cualquiera que esta sea.

Rodney Brooks escribe: «Durante los próximos diez o veinte años se producirá un cambio cultural que nos llevará a aceptar la introducción en nuestros cuerpos de tecnología robótica, silicio y acero, con el fin de mejorar nuestras posibilidades y comprender el mundo». Analizando los avances realizados en la Universidad Brown y la Universidad Duke en lo que a conectar el cerebro directamente a un ordenador o a un brazo mecánico se refiere, Brooks llega a la siguiente conclusión: «Es posible que lleguemos a tener una conexión inalámbrica con internet instalada directamente dentro de nuestros cerebros[30]».

En la etapa siguiente, Brooks contempla la fusión de silicio y células vivas, no solo para curar los padecimientos de nuestros cuerpos, sino también para aumentar poco a poco nuestras capacidades. Por ejemplo, si los implantes cocleares y retinales actuales pueden restablecer la audición y la visión, los implantes del futuro pueden darnos también unas capacidades sobrehumanas. Podríamos oír sonidos que solo los perros pueden oír, o ver rayos X, ultravioletas e infrarrojos.

Asimismo, sería posible aumentar nuestra inteligencia. Brooks cita investigaciones en las que se añaden capas suplementarias de neuronas al cerebro de una rata en un momento crítico del desarrollo de esta. Las capacidades cognitivas de estas ratas aumentaron notablemente. Brooks pronostica que en un futuro cercano la inteligencia del cerebro humano podría aumentarse mediante un procedimiento similar. En un capítulo posterior veremos que los biólogos ya han aislado un gen de las ratas que los medios de comunicación han bautizado como el «gen del ratón listo». Añadiéndoles este gen, los ratones adquieren una memoria y unas capacidades de aprendizaje mucho mayores.

Brooks prevé que a mediados de siglo sería posible añadir al cuerpo humano unos complementos aparentemente fantásticos que nos darían unas capacidades muy superiores a las de los seres humanos ordinarios. «Podemos esperar que dentro de cincuenta años veremos en el cuerpo humano unos cambios radicales producidos por modificaciones genéticas». Si se añaden además dispositivos electrónicos, «el colectivo humano expandirá sus capacidades de una manera que hoy en día nos resulta inimaginable. […] No volveremos a estar limitados por la evolución darwiniana», afirma Brooks[31].

Pero el riesgo es, por supuesto, que las cosas se lleven demasiado lejos. ¿Hasta dónde podríamos llegar en la fusión con nuestras criaturas robóticas sin que algunas personas se rebelen porque las encuentren repulsivas?

SUSTITUTOS Y AVATARES

Una manera de fusionarnos con los robots sin alterar el cuerpo humano es crear sustitutos o avatares. En la película *Los sustitutos*, protagonizada por Bruce Willis, se dice que en el año 2017 los científicos han descubierto un modo de que las personas controlen a los robots como si estuvieran dentro de ellos, con lo que pueden vivir sus vidas en unos cuerpos perfectos. El robot obedece cualquier orden, y la persona ve y siente también todo lo que el robot ve y siente. Mientras que nuestros cuerpos mortales decaen y se debilitan, siempre podemos controlar los movimientos de nuestro robot sustituto, que tiene poderes sobrehumanos y está perfectamente configurado. En la película la situación se complica porque las personas prefieren vivir sus vidas como robots guapos y superpoderosos y abandonan sus cuerpos decadentes, que se desechan y quedan convenientemente escondidos. De hecho, toda la especie humana decide convertirse en robótica en vez de enfrentarse a la realidad.

En la película *Avatar*, las cosas van un paso más allá. En el año 2154, en vez de vivir nuestras vidas como robots perfectos, podríamos vivir como seres distintos de nosotros. En la película, nuestros cuerpos están metidos en unas burbujas, lo cual luego nos permite controlar el movimiento de unos cuerpos ajenos especialmente clonados. En cierto sentido, nos dan unos cuerpos totalmente nuevos para vivir en un nuevo planeta. De este modo, podemos comunicarnos mejor con la población alienígena nativa de otros planetas. El argumento de la película se tensa cuando un trabajador decide abandonar su naturaleza humana y vivir su vida como un alienígena, protegiéndolos de los mercenarios.

Estos sustitutos y avatares no son posibles a día de hoy, pero pueden serlo en el futuro.

Recientemente, ASIMO ha sido programado con un nuevo concepto: percepción remota. En la Universidad de Kioto se ha entrenado a unos seres humanos para que controlen el movimiento mecánico de los robots utilizando sensores cerebrales. Por ejemplo, colocándose un casco de EEG, los estudiantes pueden mover los brazos y las piernas de ASIMO utilizando simplemente el pensamiento. Por ahora son posibles cuatro movimientos distintos de los brazos y la cabeza. Esto puede abrir la puerta a otro dominio de la IA: robots controlados por la mente.

Aunque esta es una pobre demostración del poder de la mente sobre la materia, durante las próximas décadas tendría que ser posible aumentar el conjunto de movimientos que podemos controlar en un robot y también recibir información sobre las acciones realizadas, de tal modo que podamos «sentir» con nuestras nuevas manos robóticas. Unas gafas o unas lentes de contacto nos permitirían ver lo que ven los robots, con lo cual podríamos llegar a tener pleno control sobre los movimientos del cuerpo.

Esto podría también contribuir a aliviar el problema de la inmigración en Japón. Los trabajadores podrían estar en distintos países y, sin embargo, controlar a unos

robots que se encuentran a miles de kilómetros de distancia sin más que colocarse unos sensores cerebrales. Así, internet podría transportar no solo los pensamientos de los trabajadores de cuello blanco, sino también los de los trabajadores de mono azul y traducirlos en movimiento físico. Significaría que los robots se convertirían en parte integrante de cualquier nación que quiera solucionar el aumento de los costes sanitarios y la escasez de mano de obra.

Controlar los robots mediante percepción remota también puede tener aplicaciones en otros campos. En cualquier situación de peligro (por ejemplo, bajo el agua, cerca de líneas de alta tensión, en incendios), los robots controlados por el pensamiento humano pueden utilizarse en misiones de rescate. O bien unos robots submarinos pueden conectarse directamente a unos seres humanos que, solo con el pensamiento, controlarían varios robots nadadores. Dado que el sustituto tendría superpoderes, podría perseguir criminales (salvo que los criminales tuvieran también sustitutos dotados de superpoderes). Tendríamos todas las ventajas de la fusión con los robots, sin modificar en lo más mínimo nuestros cuerpos.

En realidad, una solución como esta resultaría útil para la exploración del espacio, en los casos en que hubiera que gestionar una base lunar permanente. Nuestros sustitutos podrían realizar todas las tareas peligrosas de mantenimiento en la base lunar, mientras que los astronautas están a salvo en la Tierra. Los astronautas tendrían la superfuerza y los superpoderes de los robots para explorar un peligroso territorio de otro planeta. (Sin embargo, esto no serviría si los astronautas están en la Tierra controlando unos sustitutos en Marte, ya que las señales de radio tardan 40 minutos en ir de la Tierra a Marte y volver. Pero sí funcionaría si los astronautas estuvieran a salvo en una base permanente situada en Marte, mientras los sustitutos salen al exterior y realizan las tareas peligrosas sobre la superficie de Marte).

¿HASTA DÓNDE LLEGARÍA LA FUSIÓN CON LOS ROBOTS?

El pionero de la robótica Hans Moravec da unos cuantos pasos más y se imagina una versión extrema de todo esto: nos convertiremos en los propios robots que nosotros hemos construido. Me explicó cómo podríamos fusionarnos con nuestras creaciones robóticas sometiéndonos a una operación cerebral que sustituiría cada neurona de nuestro cerebro por un transistor situado en el interior de un robot. La operación comienza cuando nos acostamos junto a un cuerpo robótico sin cerebro. Un cirujano robótico extrae todos los cúmulos de materia gris de nuestro cerebro, hace duplicados transistor a transistor, conecta las neuronas a estos transistores y los coloca en el cráneo vacío del robot. A medida que cada cúmulo de neuronas queda duplicado dentro del robot, el cúmulo es desechado. Mientras esta delicada operación tiene lugar, nos encontramos plenamente conscientes. Parte del cerebro lo tenemos dentro de nuestro viejo cuerpo, pero la otra parte está ahora hecha de transistores y se

encuentra dentro de nuestro nuevo cuerpo robótico. Al terminar la operación, todo nuestro cerebro ha sido transferido al cuerpo de un robot. No solo tenemos un cuerpo robótico, sino también todas las ventajas de un robot: inmortalidad en cuerpos sobrehumanos que son aparentemente perfectos. Esto no será posible en el siglo XXI, pero será una opción en el siglo XXII.

En la situación última, desechamos completamente nuestros torpes cuerpos y nos convertimos al final en puros programas informáticos que codifican nuestras personalidades. «Descargamos» nuestras personalidades completas a un ordenador. Si alguien pulsa una tecla que lleva el nombre de uno de nosotros, el ordenador se comporta como si esta persona estuviera dentro de su memoria, ya que ha codificado todos los rasgos de personalidad de ese individuo dentro de sus circuitos. Nos volvemos inmortales, pero pasamos nuestro tiempo atrapados dentro de un ordenador, interactuando con otra «gente» (es decir, otros programas informáticos) en algún ciberespacio o realidad virtual gigantescos. Nuestra existencia corporal será desechada y sustituida por el movimiento de los electrones dentro de este gigantesco ordenador. Con este panorama, nuestro destino último es terminar como líneas de código en este vasto programa informático, con todas las sensaciones aparentes de cuerpos físicos bailando en un paraíso virtual. Compartiremos pensamientos profundos con otras líneas de código informático, viviendo esta gran ilusión. Realizaremos grandes hazañas heroicas conquistando nuevos mundos, y olvidando el hecho de que no somos más que electrones que bailan dentro de algún ordenador. Por supuesto, hasta que alguien pulse el botón de apagado.

Ahora bien, un problema que genera el hecho de llevar demasiado lejos estas situaciones es el Principio del Hombre de las Cavernas. Como se ha mencionado anteriormente, la arquitectura de nuestros cerebros es la del cazadorrecolector primitivo que surgió de África hace más de 100.000 años. Nuestros más profundos deseos, nuestras apetencias y nuestras querencias se forjaron en las praderas africanas mientras huíamos de los depredadores, perseguíamos la caza, recogíamos forraje en las selvas, buscábamos pareja y nos divertíamos en torno a un fuego de campamento.

Una de nuestras directrices fundamentales, profundamente enterrada en nuestros pensamientos, es tener buen aspecto, sobre todo de cara al sexo opuesto y a nuestros semejantes. Dedicamos una parte enorme de nuestros ingresos, la mayor después de la correspondiente al ocio, a mantener en orden nuestro aspecto físico. Es la razón por la que se ha producido un incremento fulgurante en cirugía plástica, Botox, productos de cosmética, ropa sofisticada, así como el aprendizaje de nuevos pasos de baile, musculación, adquisición de la música más moderna y actividades para mantenerse en forma. De la suma de todo esto se obtiene una enorme proporción del gasto de los consumidores, que a su vez genera una parte importante de la economía estadounidense.

Esto significa que, incluso disponiendo de la posibilidad de crear cuerpos perfectos y casi inmortales, probablemente nos resistiremos al deseo de tener unos

cuerpos robóticos, si se trata de tener el aspecto de un torpe robot con implantes colgando de la cabeza. Nadie desea parecer un refugiado salido de una película de ciencia ficción. Si tenemos unos cuerpos mejorados, es preciso que nos hagan atractivos para el sexo opuesto y que mejoren nuestra reputación entre nuestros semejantes; si no es así, rechazaremos esos cuerpos. ¿Qué adolescente desea aumentar sus capacidades a costa de tener un aspecto desfasado?

Algunos escritores de ciencia ficción han acariciado la idea de que todos nosotros nos desprenderemos de nuestros cuerpos y existiremos como seres inmortales de pura inteligencia y viviremos dentro de un ordenador, absortos en pensamientos profundos. Pero ¿quién querría vivir así? Puede que nuestros descendientes no deseen resolver ecuaciones diferenciales que describan un agujero negro. Es posible que en el futuro la gente quiera pasar más tiempo escuchando música rock al modo antiguo que calculando los movimientos de partículas subatómicas al tiempo que pasan sus vidas dentro de un ordenador.

Greg Stock, de la UCLA, va más allá y considera que tener nuestros cerebros conectados a un superordenador aporta pocas ventajas. Stock dice: «Cuando intento pensar en lo que podría ganar con un vínculo entre mi cerebro y un superordenador, no tengo más remedio que insistir en dos criterios: que los beneficios no se conseguirían fácilmente mediante algún otro procedimiento no invasivo, y que los beneficios tienen que compensar los inconvenientes de una cirugía cerebral[32]».

Así pues, aunque hay muchas opciones posibles para el futuro, personalmente creo que la vía más probable es que construiremos robots con la idea de que sean benevolentes y amables, y que aumenten nuestras capacidades hasta cierto punto, pero seguiremos el Principio del Hombre de las Cavernas. Aceptaremos la perspectiva de vivir temporalmente la vida de un superrobot mediante sustitutos, pero nos resistiremos a la idea de vivir de manera permanente dentro de un ordenador o modificar nuestros cuerpos hasta que resulten irreconocibles.

BARRICADAS FRENTE A LA SINGULARIDAD

Nadie sabe en qué momento los robots llegarán a ser tan listos como los seres humanos. Sin embargo, personalmente, situaría esa fecha cerca de finales de siglo por varias razones.

En primer lugar, los fulgurantes avances en tecnología informática se han debido a la ley de Moore. Estos avances empezarán a producirse a menor velocidad, y quizá incluso se detengan en torno a los años que van de 2020 a 2025, por lo que no está claro si podemos calcular de manera fiable la velocidad de los ordenadores más allá de esas fechas. (Véase el capítulo 4 para más información sobre la era postsilicio). En este libro he supuesto que la potencia de ordenador seguirá creciendo, pero a una velocidad más lenta.

En segundo lugar, incluso si un ordenador puede calcular a velocidades tan fantásticas como 10^{16} cálculos por segundo, esto no significa necesariamente que sea más inteligente que nosotros. Por ejemplo, Deep Blue, la máquina de jugar al ajedrez de IBM, podría analizar 200 millones de posiciones por segundo, derrotando al campeón mundial. Pero Deep Blue, con toda su velocidad y toda su potencia bruta de ordenador, no puede hacer nada más. Sabemos que la auténtica inteligencia es mucho más que calcular posiciones de ajedrez.

Por ejemplo, los sabios autistas pueden llevar a cabo unas proezas de memorización y cálculo que parecen milagrosas. No obstante, tienen dificultades para atarse los cordones de los zapatos, para conseguir un empleo o para adaptarse a la vida social. El difunto Kim Peek, una persona tan notable que la película *El hombre de la lluvia* está basada en su extraordinaria vida, memorizó todas las palabras contenidas en 12.000 libros y podía realizar cálculos que solo un ordenador podía comprobar. Sin embargo, tenía un cociente de inteligencia de 73, tenía dificultades para mantener una conversación y necesitaba constantemente ayuda para sobrevivir. Sin la ayuda de su padre, en gran medida estaba desvalido. En otras palabras, los ordenadores superrápidos del futuro serán como sabios autistas, es decir, podrán memorizar amplias cantidades de información, pero no podrán hacer mucho más y serán incapaces de sobrevivir por sus propios medios en el mundo real.

Incluso si los ordenadores comienzan a igualar la velocidad de cálculo del cerebro, les faltará la programación y el soporte lógico necesarios para que todo funcione. Igualar la velocidad de cálculo del cerebro no es más que un humilde inicio.

En tercer lugar, incluso si los robots inteligentes son posibles, no está claro si un robot puede hacer una copia de sí mismo que sea más inteligente que el original. Las matemáticas que subyacen en los robots autorreplicadores fueron desarrolladas primero por el matemático John von Neumann, que inventó la teoría de juegos y contribuyó a desarrollar el ordenador electrónico. Fue pionero en la cuestión de determinar el número mínimo de premisas necesarias para que una máquina pudiera crear una copia de sí misma. Sin embargo, nunca formuló la pregunta de si un robot puede hacer una copia de sí mismo que sea más inteligente que él mismo. De hecho, la propia definición de «inteligente» es problemática, ya que no hay una definición de «inteligencia» que esté universalmente aceptada.

Ciertamente, mejorando la calidad y aumentando el número de chips, un robot podría crear una copia de sí mismo dotada de más memoria y mayor capacidad de procesamiento. Pero ¿significa esto que la copia es más inteligente, o solo que es más rápida? Por ejemplo, una máquina calculadora es millones de veces más rápida que un ser humano, con mucha más memoria y velocidad de procesamiento, pero, desde luego, no es más inteligente. La inteligencia es más que solo memoria y velocidad.

En cuarto lugar, aunque los equipos y dispositivos informáticos (*hardware*) pueden progresar exponencialmente, no sucede lo mismo con los programas

informáticos (*software*). Mientras los equipos han mejorado gracias a la posibilidad de esculpir transistores cada vez más pequeños en una oblea, la cuestión de los programas informáticos es totalmente diferente; requiere que un ser humano se siente con lápiz y papel y escriba códigos. Y aquí está el cuello de botella: el ser humano.

La programación, como cualquier actividad humana creativa, avanza a trompicones, con ideas brillantes, pero también con largos intervalos de trabajo pesado y estancamiento. A diferencia de la simple tarea de esculpir más transistores en el silicio, que ha ido a más de manera constante e ininterrumpida, la programación depende de la naturaleza impredecible de la creatividad y la fantasía humanas. Por consiguiente, cualquier predicción relativa al crecimiento continuo y exponencial de la potencia de ordenador ha de ser matizada. Una cadena no es más fuerte que su eslabón más débil, y aquí el eslabón más débil es el soporte lógico y la programación que han de realizar los seres humanos.

El progreso en ingeniería crece a menudo exponencialmente, sobre todo cuando se trata solo de conseguir una mayor eficiencia, como lo de esculpir más y más transistores en una oblea de silicio. Sin embargo, cuando se trata de investigaciones básicas, que requieren suerte, habilidad e inesperados golpes de genialidad, el progreso es más bien como un «equilibrio puntuado», con largos intervalos de tiempo en los que no sucede gran cosa y repentinos avances que cambian todo el panorama. Si examinamos la historia de la investigación básica, desde Newton, pasando por Einstein hasta el presente, vemos que el equilibrio puntuado es lo que describe con mayor exactitud el modo en que se produce el progreso.

En quinto lugar, como ya hemos visto en la investigación de la ingeniería inversa del cerebro, el apabullante coste y las dimensiones totales del proyecto lo retrasarán probablemente hasta mediados de este siglo. Además, posteriormente la interpretación de todos estos datos puede llevar muchas más décadas, atrasando el resultado final de la ingeniería inversa del cerebro hasta las postrimerías de este siglo.

En sexto lugar, es probable que no se produzca un «big bang» cuando las máquinas se vuelvan de repente conscientes. Como hemos dicho antes, si definimos la consciencia como algo que incluye la capacidad de hacer planes para el futuro poniendo en marcha simulaciones del mismo, entonces hay un espectro de la consciencia. Las máquinas ascenderán lentamente en esta escala, dándonos así mucho tiempo para prepararnos. Creo que esto sucederá hacia finales de este siglo, por lo que hay tiempo de sobra para discutir las diversas opciones que podríamos tener. Además, la consciencia de las máquinas tendrá probablemente sus propias peculiaridades. Primero se desarrollará una forma de «consciencia de silicio», y no una consciencia totalmente humana.

Ahora bien, esto plantea otra cuestión. Aunque hay procedimientos mecánicos para aumentar las posibilidades de nuestros cuerpos, también hay otros que son biológicos. De hecho, el impulso de la evolución se basa por completo en la selección

de los mejores genes. Entonces, ¿por qué no atajar saltándonos millones de años de evolución y tomar el control de nuestro destino genético?

3

EL FUTURO DE LA MEDICINA

Más allá de la perfección



En realidad, nadie tiene agallas para decirlo, pero, si supiéramos cómo añadir genes para fabricar seres humanos de mejor calidad, ¿por qué no íbamos a hacerlo?

JAMES WATSON, PREMIO NOBEL

No creo que al acabar este siglo vaya a quedar sin desvelar algún secreto relativo a nuestros cuerpos. Por lo tanto, cualquier cosa que lleguemos a imaginar probablemente se hará realidad.

DAVID BALTIMORE, PREMIO NOBEL

No pienso que haya llegado el momento, pero está cerca. Me temo que, por desgracia, pertenezco a la última generación que va a morir.

GERALD SUSSMAN

LOS DIOSES de la mitología poseían un poder absoluto: el poder sobre la vida y la muerte, la facultad de sanar a los enfermos y prolongar la vida. Lo prioritario en nuestras oraciones a los dioses fue siempre el ruego de que nos libraran de enfermedades y padecimientos.

En las mitologías griega y romana aparece el mito de Eos, la bella diosa de la aurora. Un día esta diosa se enamoró perdidamente de un guapo mortal llamado Titono. Ella tenía un cuerpo perfecto y era inmortal, pero Titono acabaría envejeciendo, se marchitaría y perecería. Decidida a salvar a su amante de este triste destino, Eos imploró a Zeus, el padre de los dioses, que concediera a Titono el don de la inmortalidad, de tal modo que ambos pudieran estar juntos eternamente. Zeus se apiadó de los enamorados y accedió a satisfacer el deseo de Eos.

Pero la diosa, con las prisas, olvidó pedir también la eterna juventud para su amado. En consecuencia, Titono fue inmortal, pero su cuerpo envejeció. Como no podía morir, se volvía cada vez más decrépito y se iba deteriorando, condenado a vivir una eternidad de dolor y sufrimiento.

Este es el desafío al que se enfrenta la ciencia del siglo XXI. Ahora los científicos están leyendo el libro de la vida, que incluye el genoma humano completo y que nos promete avances milagrosos en la comprensión del envejecimiento. Pero la prolongación de la vida sin salud ni vigor puede convertirse en un castigo eterno, como descubrió Titono de forma trágica.

A finales de este siglo también nosotros tendremos una gran parte de ese poder mítico sobre la vida y la muerte. Y no será un poder limitado a curar a los enfermos, sino que se usará para mejorar el cuerpo humano e incluso crear nuevas formas de vida. Sin embargo, esto no se hará mediante rezos y sortilegios, sino con el milagro de la biotecnología.

Uno de los científicos que están desvelando los secretos de la vida es Robert Lanza, un hombre que tiene prisa. Pertenece a una nueva generación de biólogos: es un hombre joven, cargado de energía y lleno de ideas modernas, y tiene que conseguir tantos avances en tan poco tiempo. Lanza está en la cresta de la ola de la revolución biotecnológica. Como un niño en una tienda de caramelos, disfruta explorando un territorio que aún no figura en los mapas, haciendo avances en una amplia gama de temas candentes.

Hace una o dos generaciones el camino era muy diferente. Podíamos encontrarnos con biólogos que examinaban aplicadamente oscuros gusanos e insectos, estudiando con enorme paciencia los detalles de su anatomía y desesperándose por encontrar los nombres latinos con que los iban a bautizar.

Pero no es el caso de Lanza.

Me reuní con él un día en un estudio radiofónico para hacerle una entrevista, y me impresionaron su juventud y su creatividad sin límites. Como de costumbre, Lanza andaba corriendo de un experimento a otro. Me contó que sus inicios en esta actividad vertiginosa habían sido los habituales en la mayoría de los casos. Procedía de una modesta familia de clase trabajadora del sur de Boston, donde pocos jóvenes llegaban a la universidad. Pero, cuando estaba en el instituto, le había llegado la noticia asombrosa del descubrimiento del ADN. Le enganchó inmediatamente y decidió llevar a cabo un proyecto científico: clonar un pollo en su habitación. Sus desconcertados padres no entendían lo que el muchacho iba a hacer, pero le dieron su bendición.

Decidido a poner en marcha su proyecto, Lanza fue a Harvard a asesorarse. Como no conocía a nadie, preguntó por algunas direcciones a un hombre que él tomó por un conserje. El supuesto conserje, intrigado, se lo llevó a su despacho. Lanza averiguó más tarde que aquel conserje era en realidad uno de los investigadores que dirigían el laboratorio. El investigador se quedó impresionado por la enorme audacia de aquel joven y descarado alumno de instituto y lo presentó a otros científicos que trabajaban allí, entre los que había muchos investigadores candidatos al premio Nobel, que cambiarían la vida del muchacho. Lanza se compara a sí mismo con el personaje de Matt Damon en la película *El indomable Will Hunting*, donde un desaliñado y

problemático chico de la calle, perteneciente a la clase trabajadora, asombra a los profesores del MIT deslumbrándoles con su genio matemático.

Actualmente, Lanza es un científico de alto nivel en el campo de la tecnología celular avanzada, y a él se deben cientos de publicaciones e inventos. En 2003 apareció en los titulares de prensa cuando el parque zoológico de San Diego le pidió que clonara un banteng, una especie de buey salvaje en peligro de extinción, a partir de los restos de uno que llevaba veinticinco años muerto. Lanza consiguió extraer del esqueleto unas células que aún eran utilizables, las procesó convenientemente y las envió a una granja de Utah. Allí las células fertilizadas se implantaron en una vaca. Diez meses más tarde, le llegó la noticia de que su última creación acababa de nacer. Otro día Lanza podía estar trabajando en «ingeniería de tejidos», una disciplina que puede llegar a crear una tienda del cuerpo humano en la que podríamos encargar órganos nuevos, crecidos a partir de nuestras propias células, para sustituir órganos que están enfermos o se han desgastado. Otro día podía estar trabajando en la clonación de células humanas embrionarias. Formó parte del histórico equipo que creó por primera vez un embrión humano con el fin de generar células madre embrionarias.

TRES ETAPAS DE LA MEDICINA

Lanza cabalga sobre la ola de los descubrimientos generada al revelarse la información oculta dentro de nuestro ADN. Históricamente, la medicina ha atravesado tres etapas importantes. En la primera, que duró decenas de miles de años, la medicina estuvo dominada por la superstición, la brujería y los rumores. Dado que la mayoría de los niños morían al nacer, la esperanza media de vida se situaba entre los dieciocho y los veinte años. Durante este período se descubrieron algunas hierbas medicinales y ciertos productos químicos muy útiles, como la aspirina, pero en general no existía un modo sistemático de buscar nuevas terapias. Por desgracia, los remedios que realmente funcionaban fueron secretos celosamente guardados. El «doctor» se ganaba la vida complaciendo a los pacientes ricos y tenía especial interés por mantener sus pociones y sus cánticos en secreto.

Durante este período uno de los fundadores de la Clínica Mayo escribió un diario personal mientras visitaba a sus pacientes. En ese diario anotó que en su maletín negro había solo dos ingredientes activos que funcionaban realmente: una sierra y morfina. La sierra se usaba para amputar extremidades enfermas, y la morfina para calmar el dolor de la amputación. Siempre funcionaban bien. Se lamentaba tristemente de que el resto de lo que había en su maletín era aceite de serpiente[*] y potingues fraudulentos.

La segunda etapa de la medicina comenzó en el siglo XIX, con la llegada de la bacteriología y una higiene mejor. En Estados Unidos la esperanza de vida ascendió

en 1900 hasta los cuarenta y nueve años. Cuando decenas de miles de soldados estaban muriendo en los campos de batalla europeos durante la Primera Guerra Mundial, había una necesidad urgente de que los médicos llevaran a cabo experimentos reales con resultados reproducibles, que luego se publicaban en las revistas médicas. Los reyes europeos, horrorizados por el hecho de que sus mejores y más brillantes militares estuvieran siendo masacrados, exigían resultados auténticos, no meros trucos. Los médicos, en vez de limitarse a intentar complacer a clientes ricos, empezaron a luchar por la fama y el reconocimiento que les daba la publicación de artículos en revistas revisadas por especialistas. Así se constituyó el escenario adecuado para que se produjeran avances en los antibióticos y las vacunas que aumentaron la esperanza de vida hasta los setenta años o más.

La tercera etapa de la medicina es la medicina molecular. Estamos presenciando la fusión de la física y la medicina, que reduce esta última a átomos, moléculas y genes. Esta transformación histórica se inició en la década de 1940, cuando el físico austríaco Erwin Schrödinger, uno de los fundadores de la teoría cuántica, escribió un libro de gran repercusión titulado *¿Qué es la vida?* Rechazaba la idea de que hubiera un espíritu misterioso, o fuerza vital, que animara a los seres vivos. Por el contrario, Schrödinger especuló con la teoría de que la vida estaba basada en algún tipo de código, y que este estaba codificado en una molécula. Formuló la conjetura de que, si se hallaba aquella molécula, se podría desvelar el secreto de la vida.

El físico Francis Crick, inspirado por el libro de Schrödinger, trabajó en equipo con el genetista James Watson para probar que el ADN era aquella molécula fabulosa. En 1953, en uno de los descubrimientos más importantes de todos los tiempos, Watson y Crick desentrañaron la estructura del ADN, que resultó ser una doble hélice. Si se estira, una sola hebra de ADN tiene una extensión de unos 90 centímetros. En ella está contenida una secuencia de 3.000 millones de ácidos nucleicos, llamados A, T, C y G (adenina, timina, citosina y guanina), que lleva el código. Leyendo la secuencia precisa de estos ácidos nucleicos situados a lo largo de la molécula de ADN, se podía leer el libro de la vida.

Los rápidos avances conseguidos en la genética molecular condujeron finalmente a la creación del Proyecto Genoma Humano, un auténtico hito en la historia de la medicina. Se trataba de un programa masivo de choque para hallar la secuencia de todos los genes del cuerpo humano, su coste era de unos 3.000 millones de dólares y requería el trabajo de cientos de científicos que colaboraban en todo el mundo. Cuando por fin se terminó en 2003, fue el anuncio de una nueva era en la ciencia. Algún día todo el mundo tendrá su genoma personalizado grabado en un CD-ROM. Contendrá para cada individuo una lista de sus aproximadamente 25.000 genes; será su propio «manual de instrucciones».

El premio Nobel David Baltimore lo resumió de la siguiente manera: «La biología es hoy una ciencia de la información[1]».

EL FUTURO CERCANO
(DESDE EL PRESENTE HASTA 2030)

MEDICINA GENÓMICA

Lo que está impulsando esta increíble explosión de avances médicos es, en parte, la teoría cuántica y la revolución informática. La teoría cuántica nos ha dado unos modelos sorprendentemente detallados de la disposición de los átomos en cada proteína y en cada molécula de ADN. Sabemos cómo construir las moléculas de la vida, átomo a átomo, a partir de la nada. La construcción de la secuencia de genes, que antes era un proceso largo, tedioso y caro, se realiza ahora de manera automática mediante robots. En principio, hacer la secuencia de todos los genes de un solo cuerpo humano cuesta varios millones de dólares. El proceso es tan caro y lleva tanto tiempo que solo unas pocas personas (incluidos los científicos que han perfeccionado esta tecnología) han hecho que les lean sus genomas. Sin embargo, dentro de unos pocos años esta exótica tecnología estará al alcance de cualquier ciudadano medio.

(Tengo un vivo recuerdo de la conferencia sobre el futuro de la medicina que pronuncié a finales de la década de 1990 en Frankfurt. Predije que en el año 2020 los genomas personales serían una posibilidad real, y que cualquiera podría tener un CD o un chip en el que estuviera la descripción de sus genes. Pero, entonces, uno de los asistentes a la conferencia reaccionó lleno de indignación. Se puso en pie y dijo que aquel sueño era imposible. El problema era simplemente que había demasiados genes, y costaría demasiado ofrecer genomas personales a todo el mundo. El Proyecto Genoma Humano había costado 3.000 millones de dólares; el coste de secuenciar los genes de un individuo probablemente no bajaría mucho de ese importe. Más tarde comenté con él esta cuestión y poco a poco fue quedando claro cuál era el problema. Esta persona estaba pensando de manera lineal. Pero la ley de Moore estaba haciendo que los costes disminuyeran, porque hacía posible que la secuenciación de ADN se realizara utilizando robots, ordenadores y aparatos automáticos. Mi interlocutor no comprendía el profundo impacto de la ley de Moore en la biología. Al recordar aquel incidente, ahora me doy cuenta de que, si había algún error en mi predicción, este consistía en sobrestimar el tiempo que se tardaría en llegar a ofrecer genómicas personales).

Por ejemplo, un ingeniero de Stanford llamado Stephen R. Quake ha perfeccionado el último adelanto en la secuenciación de genes. Ha conseguido que el coste baje a 50.000 dólares y prevé que el precio descienda hasta 1.000 dólares en unos pocos años. Los científicos han especulado mucho con la posibilidad de que, cuando el precio de la secuencia de los genes humanos baje a 1.000 dólares, esto abra las puertas a una realización masiva de secuencias de genes humanos, de modo que una gran parte de la especie humana pueda beneficiarse de esta tecnología. Dentro de

unas pocas décadas, el precio de la secuenciación de todos los genes de cualquiera de nosotros podrá costar menos de 100 dólares, no más que un análisis de sangre.

(La clave para conseguir este avance es tomar un atajo. Quake compara el ADN de una persona con las secuencias que ya se hayan hecho para otras. Divide el genoma humano en unidades de ADN que contienen 32 bits de información. A continuación, utiliza un programa informático que compara estos fragmentos de 32 bits con los genomas ya realizados a otras personas. Como dos seres humanos son casi idénticos en su ADN, ya que difieren, por término medio, en menos de un 0,1 por ciento, esto significa que un ordenador puede realizar rápidamente una comparación entre estos dos fragmentos de 32 bits).

Quake se convirtió en la octava persona del mundo que se hizo la secuenciación completa de su genoma. Tenía también un interés personal por llevar adelante este proyecto, ya que buscaba en su genoma personal evidencias de enfermedades cardíacas. Lamentablemente, su genoma indicó que había heredado una versión de un gen asociado con dichas enfermedades. «Hay que echarle mucho valor a la cosa cuando uno mira su propio genoma», dijo con tristeza[2].

Conozco esa sensación horripilante. Hice que me exploraran parcialmente mi propio genoma y me lo grabaran en un CDROM para un programa especial que presenté en BBCTV/Discovery. Un médico me extrajo un poco de sangre del brazo, la envió al laboratorio de la Universidad Vanderbilt y, dos semanas más tarde, recibí por correo un CDROM con una lista de miles de mis genes. Tuve una curiosa sensación al tener ese disco en mis manos, ya que sabía que contenía un proyecto parcial de mi cuerpo. En principio, el disco se podía utilizar para crear una copia bastante fiel de mí mismo.

Sin embargo, también me picaba la curiosidad, porque los secretos de mi cuerpo estaban contenidos en aquel CDROM. Por ejemplo, podía ver si poseía algún gen especial que aumentara mis probabilidades de contraer la enfermedad de Alzheimer. Era algo que me preocupaba porque mi madre murió de Alzheimer. (Afortunadamente, yo no tengo ese gen).

Además, cuatro de mis genes fueron comparados con el genoma de miles de personas de todo el mundo que también se habían hecho analizar los genes. A continuación, las procedencias de los individuos que coincidían exactamente con mis cuatro genes se situaron en un mapa de la Tierra. Analizando los puntos marcados en el mapa, pude ver una larga estela de puntos que empezaba en el Tíbet y se extendía a través de China hasta Japón. Fue sorprendente observar que la estela seguía las antiguas pautas migratorias de los antepasados de mi madre, remontándose a miles de años atrás. Mis antepasados no dejaron información escrita sobre su antigua migración, pero el mapa de sus viajes estaba grabado en mi sangre y en mi ADN. (También es posible seguir la pista de los antepasados paternos. Los genes mitocondriales pasan sin modificarse de las madres a las hijas, mientras que el

cromosoma Y pasa del padre al hijo varón. Por lo tanto, analizando estos genes, se puede seguir el rastro de los antepasados por línea materna o paterna).

Imagino que en un futuro cercano muchas personas tendrán la misma sensación extraña que yo tuve, cuando tengan en las manos el proyecto de sus cuerpos y lean los íntimos secretos, incluidas las enfermedades peligrosas, que se esconden en sus genomas y vean las antiguas pautas migratorias que siguieron sus antepasados.

Ahora bien, para los científicos esto abre una rama nueva de la ciencia que se llama bioinformática, es decir, la utilización de ordenadores para escanear y analizar rápidamente el genoma de miles de organismos. Por ejemplo, introduciendo en el ordenador los genomas de varios cientos de individuos que sufren una determinada enfermedad se podría determinar la ubicación precisa del ADN dañado. De hecho, algunos de los ordenadores más potentes del mundo están trabajando en bioinformática, analizando millones de genes hallados en plantas y animales para buscar ciertos genes fundamentales.

Esto podría revolucionar incluso algunas series televisivas de detectives como *CSI*. Con fragmentos diminutos de ADN (hallados en folículos capilares, saliva o manchas de sangre) se podría determinar no solo el color del pelo o de los ojos, la etnia, la altura y el historial médico de una persona, sino quizá también su rostro. Hoy en día, los dibujantes de la policía pueden hacer un molde aproximado del rostro de una víctima basándose solo en su calavera. En el futuro, un ordenador podría reconstruir los rasgos faciales de una persona con tal de que se dispusiera tan solo de algo de caspa o sangre de esa persona. (El hecho de que los gemelos idénticos tengan unos rostros notablemente similares significa que la genética por sí sola, incluso en presencia de factores del entorno, puede determinar gran parte de los rasgos faciales de una persona).

LA VISITA AL MÉDICO

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, nuestra visita a la consulta del médico cambiará radicalmente. Cuando hablemos con el médico que aparece en la pantalla mural, lo más probable es que estemos hablando con un programa informático. Nuestro cuarto de baño tendrá más sensores que un hospital moderno, y esos sensores detectarán calladamente las células cancerosas años antes de que se forme un tumor. Por ejemplo, alrededor del 50 por ciento de los cánceres comunes se producen cuando hay una mutación en el gen p53, que puede ser detectado con facilidad utilizando los sensores.

Si hay evidencia de un cáncer, entonces unas nanopartículas serán inyectadas directamente en la sangre y, como bombas inteligentes, introducirán en las células cancerosas unos medicamentos que combatan el cáncer. La quimioterapia actual nos parecerá lo mismo que nos parecen ahora las sanguijuelas que se utilizaban hace un

siglo. (En el capítulo siguiente hablaré más detenidamente sobre la nanotecnología, los chips de ADN, las nanopartículas y los nanobots).

Además, si el médico de la pantalla mural no puede curar una enfermedad o una lesión detectadas en un órgano, simplemente nos crecerá otro. Solo en Estados Unidos hay 91.000 personas que esperan un trasplante de órganos. Dieciocho de ellas mueren cada día esperando un órgano que nunca llega.

Si nuestro médico virtual encuentra algo que no está bien, como, por ejemplo, un órgano enfermo, podrá prescribir que otro nuevo crezca directamente a partir de nuestras propias células. La «ingeniería de tejidos» (o medicina regenerativa) es uno de los campos de la medicina que se encuentran en plena ebullición, y que harán posible una «tienda del cuerpo humano». Por ahora, los científicos pueden hacer crecer en el laboratorio cosas tales como piel, sangre, vasos sanguíneos, válvulas para el corazón, cartílago, hueso, narices y orejas a partir de nuestras propias células. El primer órgano importante que se fabricó de esta manera fue la vejiga en 2007, y la primera tráquea en 2009. Hasta ahora, los únicos órganos que se han generado han sido relativamente simples, es decir, órganos con unos pocos tipos de tejidos y unas pocas estructuras. Dentro de cinco años podrán generarse el primer hígado y el primer páncreas, y eso tendrá enormes consecuencias en la salud pública. El premio Nobel Walter Gilbert me dijo que preveía una época, tan solo dentro de unas pocas décadas, en que prácticamente cualquier órgano del cuerpo se generará a partir de las propias células de su destinatario.



En el futuro tendremos *tricorders* (o tricodificadores), como este que aparecía en *Star Trek*, que podrán diagnosticar casi todas las enfermedades; esto será posible gracias a los detectores de IRM y los chips de ADN.

La ingeniería de tejidos genera órganos nuevos extrayendo primero unas pocas células del cuerpo. Estas células se inyectan en un molde de plástico cuyo aspecto es el de una esponja con la forma del órgano en cuestión. El molde de plástico está hecho de ácido poliglicólico biodegradable. Las células se tratan con ciertos factores que estimulan el crecimiento, haciendo así que se vayan generando dentro del molde. Finalmente, este molde se desintegra, dejando tras de sí un órgano perfecto.

Tuve ocasión de visitar el laboratorio de Anthony Atala en la Universidad de Wake Forest, en Carolina del Norte, y fui testigo directo de esta tecnología milagrosa. Mientras recorría su laboratorio, vi frascos que contenían órganos humanos vivos. Pude ver vasos sanguíneos y vejigas; contemplé válvulas cardíacas que se abrían y cerraban constantemente porque se bombeaban líquidos a través de ellas. Al ver todos aquellos órganos humanos vivos metidos en frascos, me sentí casi como si estuviera recorriendo el laboratorio del doctor Frankenstein, pero observé varias diferencias cruciales. En el siglo XIX, los médicos ignoraban el mecanismo de rechazo que actúa en el cuerpo humano haciendo que sea imposible injertar en él órganos nuevos. Además, los médicos tampoco sabían cómo detener las infecciones que contaminarían inevitablemente cualquier órgano después de la operación quirúrgica. Por lo tanto, Atala, en vez de crear un monstruo, lo que está haciendo es iniciar una tecnología médica completamente nueva para salvar vidas que un día cambiará la faz de la medicina.

Un objetivo que se plantea el laboratorio de Atala para el futuro, quizá dentro de cinco años, es generar un hígado humano. El hígado no es tan complicado, porque contiene solo unos pocos tipos de tejido. Los hígados generados en el laboratorio podrían salvar miles de vidas, especialmente las de aquellos que necesitan desesperadamente un trasplante de dicho órgano. También podrían salvar la vida de los alcohólicos que sufren de cirrosis. (Lamentablemente, también podrían animar a la gente a seguir con sus malos hábitos, sabiendo que pueden conseguir órganos de recambio para reemplazar los que tienen dañados).

Si algunos órganos del cuerpo humano, como la tráquea o la vejiga, pueden generarse ya hoy en día, ¿qué impedirá a los científicos la fabricación de cualquier otro órgano? Un problema fundamental es cómo generar los diminutos capilares que proporcionan sangre a las células. Toda célula del cuerpo necesita un suministro de sangre. Además, está el problema de generar estructuras complejas. Los riñones, que purifican la sangre eliminando sus toxinas, están formados por millones de filtros diminutos, y es muy difícil crear un molde para todos esos filtros.

Pero el órgano más difícil de generar es el cerebro humano. Aunque parece improbable que en las próximas décadas se recree o se genere un cerebro humano, puede que sí sea posible inyectar células jóvenes directamente en el cerebro, incorporándolas así a la red neuronal del mismo. Sin embargo, esta inyección de nuevas células cerebrales sería aleatoria, por lo que el paciente tendría que reaprender muchas funciones básicas. Ahora bien, dado que el cerebro es «plástico», es decir, se

renueva constantemente cada vez que aprende una nueva tarea, es posible que sea capaz de integrar esas neuronas nuevas de tal modo que funcionen correctamente.

LAS CÉLULAS MADRE

El paso siguiente es aplicar la tecnología de las células madre. Hasta ahora, los órganos humanos se han generado utilizando células que no eran células madre, sino células tratadas especialmente para proliferar dentro de unos moldes. En un futuro cercano tendría que ser posible la utilización directa de células madre.

Las células madre son las «madres de todas las células» y tienen la posibilidad de transformarse en cualquier tipo de célula del cuerpo. Cada célula de nuestro cuerpo tiene el código genético completo necesario para generar todo nuestro organismo. Pero, a medida que estas células maduran, se especializan, de tal modo que muchos de los genes se desactivan. Por ejemplo, aunque una célula de la piel pueda tener los genes necesarios para convertirse en sangre, estos genes se desconectan cuando la célula embrionaria se convierte en una célula adulta de la piel.

Pero las células madre embrionarias conservan a lo largo de toda su vida su capacidad de regenerar cualquier tipo de célula. Aunque las células madre embrionarias tienen un enorme valor para los científicos, también son objeto de controversia, ya que se ha de sacrificar un embrión para poder extraerlas, lo cual plantea cuestiones éticas. Sin embargo, Lanza y sus colegas han planteado procedimientos para tomar células madre adultas que ya se han transformado en un tipo determinado de células y luego volver a convertirlas en células madre embrionarias.

Las células madre tienen potencialmente la capacidad de curar gran número de enfermedades, como la diabetes, las enfermedades cardíacas, la enfermedad de Alzheimer, la de Parkinson, e incluso el cáncer. De hecho, es difícil pensar en una enfermedad sobre la que las células madre no vayan a producir un impacto importante. Un campo concreto de investigación es el de las lesiones de la médula espinal, de las que se pensó en otro tiempo que eran totalmente incurables. En 1995, cuando el guapo actor Christopher Reeve sufrió una grave lesión medular que le dejó totalmente paralizado, no había cura alguna. Sin embargo, en estudios realizados con animales se han conseguido grandes avances en la reparación de la médula espinal con células madre.

Por ejemplo, Stephen Davies, de la Universidad de Colorado, ha logrado éxitos notables en el tratamiento de lesiones medulares en las ratas. Davies dice: «He dirigido algunos experimentos en los que hemos trasplantado neuronas adultas directamente a sistemas nerviosos centrales de adultos. Han sido auténticos experimentos de Frankenstein. Hemos visto con gran sorpresa que las neuronas adultas eran capaces de enviar nuevas fibras nerviosas de un lado a otro del cerebro

en solo una semana». La creencia general era que, en el tratamiento de la lesión medular, cualquier intento de reparar los nervios conllevaría grandes dolores y riesgos. Davies descubrió que un tipo determinado de célula nerviosa, llamado astrocito, se presenta en dos variedades que dan resultados diferentes.

Davies dice: «Utilizando los astrocitos adecuados para reparar lesiones medulares, tenemos todas las ventajas y ningún sufrimiento, mientras que con los otros tipos se consigue lo contrario: sufrimiento y ninguna ventaja». Además, cree que las mismas técnicas que está desarrollando con células madre servirán también para víctimas de apoplejías y enfermos de Alzheimer y Parkinson.

Dado que se puede crear prácticamente cualquier célula del cuerpo humano modificando células madre embrionarias, las posibilidades son infinitas. Sin embargo, Doris Taylor, directora del Centro de Reparación Cardiovascular de la Universidad de Minnesota, advierte que todavía queda mucho trabajo por realizar. «Las células madre embrionarias representan lo bueno, lo malo y lo peligroso[3]. Cuando son buenas, pueden reproducirse hasta dar grandes números de células en el laboratorio y utilizarse para generar tejidos, órganos u otras partes del cuerpo. Si son malas, no saben cuándo han de dejar de reproducirse y generan tumores. En cuanto a las peligrosas, bueno, no comprendemos todas las indicaciones, por lo que no podemos controlar el resultado, y no estamos dispuestos a utilizarlas sin haber hecho más investigaciones en el laboratorio», afirma Taylor.

Este es uno de los principales problemas a los que se enfrenta la investigación con células madre: el hecho de que estas células, si no reciben indicaciones químicas del entorno, podrían continuar proliferando sin control hasta volverse cancerosas. Los científicos se dan cuenta ahora de que los sutiles mensajes químicos que viajan de una célula a otra, diciéndoles dónde y cuándo han de crecer y dejar de crecer, son tan importantes como la célula misma.

No obstante, se están produciendo avances lentos pero reales, especialmente en los estudios realizados con animales. Taylor protagonizó titulares de prensa en 2008 cuando su equipo, por primera vez en la historia, generó, partiendo casi de la nada, un corazón de ratón que latía. Su equipo comenzó con un corazón de ratón, disolviendo las células que este contenía, dejando solo el andamiaje, una matriz de proteínas con forma de corazón. Luego plantaron una mezcla de células madre del corazón dentro de esa matriz y observaron cómo esas células madre proliferaban en el interior del andamiaje. Previamente, los científicos habían logrado reproducir células del corazón en una placa de Petri. Pero esta era la primera vez que un corazón real y con latidos se generaba en el laboratorio.

Generar ese corazón fue también un acontecimiento personal emocionante para ella. Taylor ha dicho: «Es fabuloso, se puede ver todo el árbol vascular, desde las arterias hasta las venas diminutas que aportan sangre a todas y cada una de las células del corazón[4]».

También una parte del gobierno de Estados Unidos está profundamente interesado por conseguir avances en la ingeniería de tejidos: el ejército. En las guerras del pasado, la mortandad en el campo de batalla era abrumadora: regimientos y batallones quedaban diezmados, y muchos soldados morían a causa de las heridas. Ahora los equipos médicos de evacuación urgente transportan en avión a los heridos desde Irak y Afganistán hasta Europa o Estados Unidos, donde reciben atención médica del más alto nivel. La tasa de supervivencia de los soldados se ha disparado. Y también el número de soldados que han perdido brazos o piernas. En consecuencia, el ejército de Estados Unidos ha declarado prioritaria la búsqueda de algún modo de regenerar esos miembros amputados.

Un avance realizado por el Instituto de Medicina Regenerativa de las Fuerzas Armadas ha sido utilizar un método radicalmente nuevo para generar órganos. Los científicos sabían desde hace mucho tiempo que las salamandras poseían unos notables poderes de regeneración, consiguiendo que les crecieran miembros enteros que habían perdido. Estos miembros vuelven a crecer porque las células madre de las salamandras son estimuladas para producir nuevos miembros. Una teoría que ha dado sus frutos está siendo estudiada por Stephen Badylak, de la Universidad de Pittsburgh, que ha conseguido regenerar yemas de los dedos. Su equipo ha creado un «polvo mágico» que tiene el milagroso poder de regenerar tejidos. Este polvo se ha creado, no a partir de células, sino de la matriz extracelular que existe entre las células. Esta matriz es importante porque contiene las señales que dicen a las células madre que crezcan de una manera determinada. Cuando este polvo mágico se aplica en la punta de un dedo que ha sido cortada, estimula no solo la yema del dedo, sino también la uña, produciendo una copia casi perfecta del dedo original. De este modo se ha logrado hacer crecer hasta casi un centímetro de tejido y uña. El objetivo siguiente es ampliar este proceso para ver si es posible regenerar un miembro humano completo, como en el caso de las salamandras.

LA CLONACIÓN

Si podemos generar diversos órganos del cuerpo humano, entonces ¿podremos regenerar un ser humano completo, creando una copia genéticamente exacta, es decir, un clon? En principio, la respuesta es sí, pero aún no se ha hecho, a pesar de que muchas veces se haya dicho lo contrario.

Los clones son un tema muy socorrido en las películas de Hollywood, si bien en estas generalmente se prescinde de la ciencia. En la película *El sexto día*, el personaje que interpreta Arnold Schwarzenegger lucha contra unos malos que dominan el arte de clonar seres humanos. Y, lo que es más importante, son maestros en el arte de copiar en su totalidad la memoria de una persona y luego insertarla en el clon. Cuando Schwarzenegger consigue eliminar a uno de los malos, aparece otro con la

misma personalidad e idéntica memoria. Las cosas se complican cuando descubre que se ha hecho un clon de él sin su consentimiento. (En realidad, cuando se clona un animal, no se clonan sus recuerdos).

El concepto de clonación tuvo una gran repercusión en los titulares de la prensa en 1997, cuando Ian Wilmut, del Instituto Roslin de la Universidad de Edimburgo, consiguió clonar a la oveja Dolly. Tomando una célula de una oveja adulta, extrayendo el ADN del interior de su núcleo y luego insertando este núcleo en un óvulo, Wilmut logró realizar la hazaña de crear una copia genética de la original. En una ocasión le pregunté si tenía idea de la tormenta que había desencadenado en los medios de comunicación con su histórico descubrimiento. Me dijo que no. Comprendía claramente la importancia que tenía su trabajo para la medicina, pero subestimaba la fascinación que su descubrimiento había suscitado en la gente.

Muy pronto, varios grupos de todo el mundo empezaron a reproducir esta hazaña, clonando una amplia variedad de animales, entre los cuales había ratones, cabras, gatos, cerdos, perros, caballos y ganado vacuno. Una vez fui con un equipo móvil de televisión a visitar a Ron Marquess en las proximidades de Dallas, en Texas. Marquess tiene una de las mayores granjas de ganado clonado de todo el país. En el rancho me asombró ver primeras, segundas e incluso terceras generaciones de ganado clonado, es decir, clones de los clones de otros clones. Marquess me dijo que tendrían que inventar un nuevo vocabulario para seguir la pista de las diversas generaciones de ganado clonado.

Un grupo de ganado me llamó la atención. Había como ocho gemelos idénticos, todos alineados. Andaban, corrían, comían y dormían manteniéndose en fila con gran precisión. Aunque los terneros no eran conscientes de ser clones unos de otros, instintivamente se colocaban juntos, y cada uno de ellos imitaba los movimientos de los demás.

Marquess me dijo que la clonación de ganado era potencialmente un negocio lucrativo. Si un ganadero posee un toro cuyas características físicas son superiores, podría conseguir buenos beneficios destinándolo a la reproducción. Pero, si el toro muriese, su línea genética se perdería, salvo que se hubiera recogido y congelado su esperma. Con la clonación se podría conservar viva para siempre la línea genética de los toros valiosos.

Aunque la clonación tiene aplicaciones comerciales en el caso de los animales y de la cría de ganado, sus implicaciones en el caso de los humanos no están tan claras. A pesar de las numerosas proclamaciones sensacionalistas que afirman que ya se ha clonado a un ser humano, lo más probable es que en todos los casos se trate de bulos. Hasta la fecha, nadie ha conseguido clonar a un primate, y mucho menos a un humano. Incluso la clonación de animales ha demostrado ser difícil, ya que se crean cientos de embriones defectuosos por cada uno que llega a buen término.

Y, además, aunque la clonación humana fuera posible, existen trabas sociales. En primer lugar, muchas religiones se opondrán a la clonación humana, igual que la

Iglesia católica se declaró contraria a los niños probeta en 1978, cuando Louise Brown se convirtió en el primer bebé de la historia concebido en un tubo de ensayo. Esto significa que probablemente se aprobarán leyes que prohíban esta tecnología o, al menos, la regulen con muchas restricciones. En segundo lugar, la demanda comercial de clonación humana será escasa. Como mucho, solo una pequeña parte de la especie humana estará formada por clones, incluso en el caso de que el procedimiento sea legal. Después de todo, ya tenemos clones, en forma de gemelos idénticos (y trillizos), por lo que la novedad que puedan representar los clones humanos dejará poco a poco de ser interesante.

Inicialmente, la demanda de bebés probeta fue enorme, dada la gran cantidad de parejas que eran estériles. Pero ¿quién quiere clonar a un humano? Quizá los padres que sufren por la pérdida de un hijo. O, con mayor probabilidad, algún anciano rico que está en su lecho de muerte sin tener herederos (o sin sentir un especial aprecio por los que ya tiene) y desea legarse toda su fortuna a sí mismo en forma de niño, con el fin de comenzar de nuevo.

Así pues, en el futuro, aunque se hayan podido aprobar leyes que prohíban la clonación de humanos, lo más probable es que los clones existan. Sin embargo, representarán solo un proporción ínfima de la población humana, por lo que las consecuencias sociales serán muy pequeñas.

LA TERAPIA GÉNICA

Francis Collins, actual director de los Institutos Nacionales de la Salud y, en otro tiempo, responsable de llevar a término el histórico Proyecto del Genoma Humano del gobierno, me dijo que «todos nosotros tenemos más o menos media docena de genes que están bastante fastidiados». En el pasado, no hemos tenido más remedio que sufrir a causa de esos defectos genéticos, que con frecuencia eran letales. En el futuro, según Collins, curaremos muchos de estos defectos mediante la terapia génica.

Las enfermedades genéticas han atormentado a la humanidad desde el principio de los tiempos, y en momentos decisivos han podido influir realmente en el curso de la historia. Por ejemplo, a causa de la endogamia en las familias de la realeza europea, las enfermedades genéticas han sido una plaga para la nobleza durante generaciones. Por ejemplo, Jorge III de Inglaterra sufría probablemente de una porfiria aguda intermitente, que le hacía tener ataques de locura temporales. Algunos historiadores han especulado con la idea de que esto empeoró su relación con las colonias e incitó a estas a declarar su independencia de Inglaterra en 1776.

La reina Victoria era portadora del gen de la hemofilia, que produce sangrados incontrolables. Dado que tuvo nueve hijos, muchos de los cuales se casaron con miembros de otras casas reales europeas, la «enfermedad de los reyes» se propagó

por todo el continente. En Rusia, el zarevich Alejandro, bisnieto de la reina Victoria e hijo de Nicolás II, sufría de hemofilia y, al parecer, su enfermedad pudo ser controlada a temporadas por el místico Rasputín. Este «monje loco» llegó a adquirir poder suficiente para paralizar a la nobleza rusa, retrasar unas reformas muy necesarias y, como han sugerido algunos historiadores, contribuir al estallido de la Revolución bolchevique de 1917.

Ahora bien, en el futuro la terapia génica podrá curar muchas de las 5.000 enfermedades genéticas conocidas, tales como la fibrosis quística (que padecen sobre todo los europeos del norte), la enfermedad de Tay-Sachs (que afecta a judíos de la Europa oriental) y la anemia de células falciformes (con incidencia en el colectivo de los afroamericanos). En un futuro cercano tendría que ser posible el tratamiento de numerosas enfermedades genéticas que están causadas por la mutación de un solo gen.

La terapia génica presenta dos formas: somática y germinal.

La terapia génica somática consiste en arreglar los genes defectuosos de un solo individuo. Aquí el valor terapéutico desaparece cuando el individuo muere. Más controvertida es la terapia génica germinal, en la que se reparan los genes de las células sexuales, de tal modo que el gen reparado puede transmitirse a las generaciones posteriores casi indefinidamente.

La curación de las enfermedades genéticas sigue una vía larga pero bien configurada. En primer lugar, hay que encontrar víctimas de una determinada enfermedad genética para luego construir esmeradamente sus árboles genealógicos, remontándonos a muchas generaciones atrás. Tras analizar los genes de estos individuos, se intenta determinar la ubicación precisa del gen que puede estar dañado.

A continuación, se toma una versión sana de ese gen, se inserta dicho gen en un «vector» (habitualmente, un virus inofensivo) y luego esto se inyecta al paciente. El virus inserta rápidamente el «gen bueno» en las células del paciente, curándole potencialmente de su enfermedad. En 2001 estaban en marcha o en proceso de revisión más de 500 ensayos de terapia génica por todo el mundo[5].

Sin embargo, el avance ha sido lento y los resultados desiguales. Un problema es que el cuerpo a veces confunde este virus inofensivo que contiene el «gen bueno» con un virus peligroso y empieza a atacarlo. Esto produce efectos secundarios que pueden anular el efecto del gen bueno. Otro problema es que no sean suficientes los virus que inserten correctamente el gen bueno en las células destinatarias, con lo que el cuerpo no puede producir una cantidad suficiente de la proteína adecuada.

A pesar de estas complicaciones, en el año 2000 unos científicos anunciaron en Francia que estaban en condiciones de curar a niños afectados de inmunodeficiencia combinada grave (ICG), que habían nacido sin un sistema inmunológico funcional. Algunos pacientes con ICG, como David, «el niño burbuja», tienen que vivir dentro de burbujas de plástico esterilizadas durante toda su vida. Al carecer de sistema inmunológico, cualquier enfermedad puede ser mortal para ellos. Los análisis

genéticos de estos pacientes muestran que, según lo planeado, sus células inmunológicas incorporan realmente el nuevo gen, con lo que sus sistemas inmunológicos se activan.

Pero también ha habido contratiempos[6]. En 1999, en la Universidad de Pensilvania, un paciente falleció en un ensayo de terapia génica, lo cual hizo que comenzara un proceso de examen de conciencia dentro de la comunidad científica. Era el primer caso de muerte entre los 1.100 pacientes sometidos a este tipo de terapia génica. En 2007, cuatro de los diez pacientes que se habían curado de una forma concreta de ICG desarrollaron un grave efecto secundario: leucemia. La investigación en terapia génica para la ICG se centra ahora en la curación de la enfermedad sin activar accidentalmente algún gen que pueda causar cáncer. A día de hoy, diecisiete pacientes que sufrían de una variedad diferente de ICG están libres de padecer tanto ICG como cáncer, siendo este uno de los pocos éxitos logrados en este campo.

En realidad, uno de los objetivos de la terapia génica es el cáncer. Casi el 50 por ciento de todos los cánceres comunes están ligados a un gen dañado, el p53. El gen p53 es largo y complejo; esto aumenta la probabilidad de que resulte dañado por factores medioambientales y químicos. En consecuencia, muchos experimentos de terapia génica están encaminados a insertar un gen p53 sano en los pacientes. Por ejemplo, el humo de los cigarrillos produce a menudo unas mutaciones características en tres lugares bien conocidos dentro del gen p53. En consecuencia, la terapia génica podrá llegar algún día a curar ciertas formas de cáncer de pulmón sustituyendo el gen p53 dañado.

El avance ha sido lento pero constante. En 2006, unos científicos de los Institutos Nacionales de la Salud de Maryland consiguieron tratar con éxito el melanoma metastásico, una forma de cáncer de piel, alterando una células T asesinas de tal modo que estas atacaran específicamente a las células cancerosas. Este ha sido el primer estudio que demuestra que la terapia génica puede utilizarse con éxito contra alguna forma de cáncer. Además, en 2007 unos médicos del University College y del Moorfields Eye Hospital de Londres consiguieron utilizar la terapia génica para tratar determinada forma de la enfermedad retiniana hereditaria (causada por unas mutaciones del gen RPE65).

Por otra parte, hay algunas parejas que no esperan a la terapia génica, sino que abordan directamente los posibles problemas de su herencia genética. Una pareja puede crear varios embriones utilizando la fertilización *in vitro*. Los embriones pueden someterse a la prueba correspondiente a alguna enfermedad genética concreta, y luego la pareja selecciona el embrión que esté libre de esa enfermedad para implantárselo a la madre. De este modo pueden eliminarse gradualmente las enfermedades genéticas sin utilizar las costosas técnicas de la terapia génica. Este procedimiento se está aplicando actualmente con algunos judíos ortodoxos de Brooklyn que tienen un alto riesgo de ser portadores de la enfermedad de Tay-Sachs.

Sin embargo, hay una enfermedad que probablemente seguirá siendo mortal a lo largo de este siglo: el cáncer.

CONVIVIR CON EL CÁNCER

En 1971, el presidente Richard Nixon, con gran publicidad y sonora fanfarria, anunció solemnemente que declaraba la guerra al cáncer. Creía que, poniendo dinero, se dispondría pronto de métodos de curación para esta enfermedad. Pero después de cuarenta años (y 200.000 millones de dólares), el cáncer es la segunda causa de muerte en Estados Unidos y es el responsable de un 25 por ciento de todos los fallecimientos. La tasa de mortalidad por cáncer ha descendido solo un 5 por ciento desde 1950 hasta 2005 (teniendo en cuenta la edad y otros factores). Se calcula que, solo durante este año, el cáncer se cobrará las vidas de 562.000 estadounidenses, lo que supone más de 1.000 personas cada día. La tasa de incidencia del cáncer ha descendido en algunos tipos de esta enfermedad, pero se mantiene tenazmente constante en otros. Además, el tratamiento del cáncer, que consiste en envenenar, rebanar e irradiar los tejidos humanos, es un valle de lágrimas para los pacientes, que a menudo se preguntan qué es peor, si la enfermedad o el tratamiento.

Visto en retrospectiva podemos ver dónde radica el error. Si nos remontamos a 1971, antes de la revolución en ingeniería genética, las causas del cáncer eran entonces un gran misterio.

Ahora los científicos saben que el cáncer es básicamente una enfermedad de nuestros genes. Tanto si está ocasionado por un virus, por la exposición a una sustancia química, por radiación o por azar, en el cáncer están presentes fundamentalmente ciertas mutaciones en cuatro o más de nuestros genes, que hacen que una célula normal «olvide cómo morir». La célula pierde el control sobre su reproducción y se multiplica de manera ilimitada, llegando a matar al paciente. El hecho de que para desarrollar un cáncer sea necesaria una secuencia de cuatro o más genes defectuosos explica probablemente por qué esta enfermedad mata décadas después de un incidente inicial. Por ejemplo, una persona puede haber tenido una quemadura solar grave en su infancia y, muchas décadas después, podría desarrollar un cáncer de piel en la misma zona de la quemadura. Esto significa que probablemente ha sido necesario todo ese tiempo para que se produzcan otras mutaciones que finalmente provoquen en la célula un proceso canceroso.

Hay al menos dos tipos importantes de genes que intervienen en el desarrollo de un cáncer; son los llamados oncogenes y supresores tumorales, que funcionan como el acelerador y el freno de un automóvil, respectivamente. El oncogén actúa como un acelerador atascado cuando se ha pisado a fondo, de tal modo que el automóvil queda fuera de control hasta que vuelca. Por consiguiente, el oncogén permite que la célula

crezca sin límite. El supresor tumoral actúa normalmente como un freno, de tal modo que, cuando está dañado, la célula es como un coche que no puede frenar.

El Proyecto del Genoma del Cáncer tiene como objetivo secuenciar los genes de la mayoría de los cánceres. Dado que cada cáncer requiere secuenciar el genoma humano, el Proyecto Genoma del Cáncer es cientos de veces más ambicioso que el Proyecto Genoma Humano.

Algunos de los primeros resultados de este largamente esperado Proyecto Genoma del Cáncer se anunciaron en 2009 y hacían referencia a los cánceres de piel y de pulmón. Fueron unos resultados asombrosos. Mike Stratton, del Instituto Sanger, dijo: «Lo que estamos viendo ahora va a transformar el modo en que entendemos el cáncer. Nunca antes hemos visto el cáncer de esta manera[7]».

Las células de un cáncer de pulmón tienen el increíble número de 23.000 mutaciones individuales, mientras que la célula del melanoma tiene 33.000 mutaciones. Esto significa que un fumador medio desarrolla una mutación por cada quince cigarrillos que fuma. (El cáncer de pulmón mata a un millón de personas al año en todo el mundo, en la mayoría de los casos a causa del hábito de fumar).

El objetivo es analizar genéticamente todos los tipos de cáncer, y son más de 100. Hay muchos tejidos en el cuerpo humano, y todos ellos pueden volverse cancerosos; hay muchos tipos de cáncer para cada tejido, y decenas de miles de mutaciones en cada tipo de cáncer. Dado el número tan alto de mutaciones, se tardará muchas décadas en determinar con precisión cuáles de estas mutaciones hacen que el mecanismo celular se vuelva loco. Los científicos desarrollarán terapias para una amplia variedad de cánceres, pero no una terapia que sirva para todos ellos, ya que el cáncer es en realidad un amplio conjunto de enfermedades.

Continuamente aparecerán en el mercado nuevos tratamientos y terapias, todos ellos diseñados para atacar al cáncer en sus raíces moleculares y genéticas. Algunos de los tratamientos más prometedores incluyen:

- la antiangiogénesis, que consiste en cortar el suministro de sangre a un tumor, de tal modo que este no crezca ya más;
- las nanopartículas, que son como «bombas inteligentes» dirigidas contra las células cancerosas;
- la terapia génica, especialmente para el gen p53;
- nuevos fármacos que actúan justo sobre las células cancerosas;
- nuevas vacunas contra los virus que pueden causar un cáncer, como el virus del papiloma humano (VPH), que puede producir cáncer cervical.

Desafortunadamente, es improbable que encontremos una cura mágica para acabar con el cáncer. Lo que haremos será curar el cáncer paso a paso. Es más que probable que las tasas de mortalidad se reduzcan considerablemente cuando tengamos chips de

ADN diseminados por todo nuestro entorno y controlando constantemente la posible existencia de células cancerosas años antes de que se forme un tumor.

Como dice el premio Nobel David Baltimore: «El cáncer es un ejército de células que luchan contra nuestras terapias, de tal modo que estoy seguro de que nos mantendrá batallando continuamente[8]».

MEDIADOS DE SIGLO (DESDE 2030 HASTA 2070)

TERAPIA GÉNICA

A pesar de los contratiempos surgidos con la terapia génica, los investigadores creen que en las próximas décadas habrá continuos avances. Muchos piensan que a mediados de siglo la terapia génica será un método estándar para el tratamiento de diversas enfermedades genéticas. Gran parte del éxito que los científicos han tenido en ensayos realizados con animales se trasladará finalmente a ensayos realizados con seres humanos.

Hasta ahora, la terapia génica se ha dirigido a enfermedades causadas por mutaciones en un solo gen. Serán las primeras que se curarán. Pero muchas enfermedades tienen como causa las mutaciones que se producen en múltiples genes, junto con ciertos desencadenantes que se encuentran en el entorno. Estas enfermedades son mucho más difíciles de tratar, pero son trastornos tan importantes como la diabetes, la esquizofrenia, la enfermedad de Alzheimer, la de Parkinson y las enfermedades cardíacas. Todas estas enfermedades muestran pautas genéticas definidas, pero no hay un gen que por sí solo sea responsable de alguna de ellas. Por ejemplo, es posible encontrarse con un esquizofrénico cuyo hermano gemelo sea normal.

A lo largo de los años se ha anunciado varias veces que los científicos habían logrado aislar algunos de los genes implicados en la esquizofrenia, siguiendo la historia genética de ciertas familias. Sin embargo, es lamentable que, a menudo, esos resultados no se hayan podido verificar mediante otros estudios independientes. O bien los resultados son erróneos, o quizá son muchos los genes que intervienen en la esquizofrenia. Además, parece ser que ciertos factores del entorno están también implicados.

A mediados de siglo, la terapia génica llegará a estar sólidamente implantada, al menos para enfermedades causadas por un único gen. Pero puede que los pacientes no se conformen solo con reparar los genes. Tal vez quieran también mejorarlos.

HIJOS DE DISEÑO

A mediados de siglo, los científicos irán más allá de la reparación de los genes, llegando a realzarlos y mejorarlos.

El deseo de tener habilidades sobrehumanas viene de antiguo y está profundamente arraigado tanto en las mitologías griega y romana como en nuestros sueños. El gran héroe Hércules, uno de los más famosos semidioses de Grecia y Roma, no consiguió sus grandes poderes por hacer ejercicio y dieta, sino por una inyección de genes divinos. Su madre era una bella mortal, Alcmene, que un día llamó la atención de Zeus, y este se disfrazó para hacerse pasar por su marido y hacerle el amor. Cuando Alcmene se quedó embarazada, Zeus anunció que aquel niño algún día sería un gran guerrero. Pero la esposa de Zeus, Hera, se puso celosa y, en secreto, planeó matar al niño retrasando su nacimiento. Alcmene estuvo a punto de morir durante aquel parto tan prolongado, pero el plan de Hera quedó al descubierto en el último momento, y Alcmene parió un niño excepcionalmente grande. Mitad hombre y mitad dios, Hércules heredó la fuerza divina de su padre para llevar a cabo hechos heroicos y legendarios.

En el futuro es posible que no seamos capaces de crear genes divinos, pero ciertamente podremos crear genes que nos darán unas habilidades sobrehumanas. Al igual que en el difícil parto de Hércules, habrá muchas dificultades para conseguir que esta tecnología dé frutos.

A mediados de siglo, los «hijos de diseño» podrían ser una realidad. Como dijo el biólogo de Harvard E. O. Wilson, «el *Homo sapiens*, la primera especie verdaderamente libre, está a punto de desmantelar la selección natural, la fuerza que nos hizo como somos. […] Dentro de poco tendremos que mirar en lo más profundo de nuestro ser y decidir en qué queremos convertirnos[9]».

Los científicos ya están en vías de desentrañar los genes que controlan las funciones básicas. Por ejemplo, el gen del «ratón inteligente», que aumenta la memoria y mejora las cualidades de los ratones, fue aislado en 1999. Los ratones que tienen el gen inteligente son más hábiles para recorrer laberintos y recordar cosas.

Varios científicos de la Universidad de Princeton, entre los que está Joseph Tsien, han creado una raza de ratones genéticamente modificados que poseen un gen suplementario llamado NR2B que contribuye a estimular la producción del neurotransmisor N-metil-D-aspartato (NMDA) en el cerebro anterior de los ratones. Los creadores de los ratones inteligentes los han bautizado con el nombre de ratones Doogie (por el personaje de la televisión Doogie Howser, M.D.).

Estos ratones inteligentes superaron a los ratones normales en diversas pruebas. Por ejemplo, se coloca un ratón en una tina de agua lechosa, y el animalito, para poder descansar, ha de encontrar una plataforma que está oculta bajo la superficie del líquido. Los ratones normales olvidan dónde se encuentra esta plataforma y nadan al azar de un lado a otro por la tina, mientras que los ratones inteligentes van derechos

al primer intento. Si se muestra a los ratones dos objetos, uno ya conocido y otro que es nuevo, los ratones normales no prestan atención al nuevo; sin embargo, los ratones inteligentes reconocen inmediatamente la presencia del objeto nuevo.

Lo más importante es que los científicos saben cómo funcionan los genes de los ratones inteligentes: regulan las sinapsis del cerebro. Si nos imaginamos el cerebro como una amplia red de autopistas, la sinapsis sería como la cabina del peaje. Si el peaje es demasiado elevado, los coches no pueden pasar la barrera: un mensaje queda detenido dentro del cerebro. Ahora bien, si el peaje es bajo, los coches pueden pasar, y el mensaje se transmite a través del cerebro. Ciertos neurotransmisores como el NMDA reducen el peaje en la sinapsis, haciendo posible que los mensajes pasen libremente. Los ratones inteligentes poseen dos copias del gen NR2B, que a su vez contribuye a la producción del neurotransmisor NMDA.

Estos ratones inteligentes cumplen la regla de Hebb: el aprendizaje se produce cuando se refuerzan ciertas vías neuronales. De manera específica, estas vías pueden reforzarse regulando las sinapsis que conectan dos fibras nerviosas, haciendo que sea más fácil el paso de las señales a través de una sinapsis.

Este resultado puede contribuir a explicar ciertas peculiaridades relativas al aprendizaje. Se sabe que, cuando un animal envejece, se reduce su capacidad de aprender. Los científicos observan este hecho en todo el reino animal. La explicación podría ser que el gen NR2B se vuelve menos activo con la edad.

Además, como hemos visto anteriormente a propósito de la regla de Hebb, los recuerdos se crearían cuando las neuronas forman una conexión fuerte. Esto podría ser cierto, ya que la activación del receptor NMDA crea una conexión fuerte.

EL GEN DEL RATÓN FORZUDO

Además, se ha conseguido aislar el «gen del ratón forzudo», que aumenta la masa muscular de tal modo que el ratón parece tener los músculos agarrotados. Se halló por primera vez en ratones que tenían unos músculos inusualmente grandes. Los científicos saben ahora que la clave está en el gen de la miostatina, que incide en la contención del crecimiento muscular. Pero, en 1997, unos científicos descubrieron que, cuando el gen de la miostatina está inactivo en los ratones, su crecimiento muscular se expande enormemente.

Poco después se produjo otro avance en Alemania, cuando unos científicos examinaron a un recién nacido que tenía unos músculos extraordinarios en los muslos y los brazos. Un estudio realizado con ultrasonidos puso de manifiesto que los músculos del niño tenían un tamaño que era el doble de lo normal. Secuenciando los genes del bebé y de su madre (que era esprínter profesional), descubrieron en ambos un patrón genético similar. De hecho, el análisis de sangre del niño dio una carencia total de miostatina.

Varios científicos de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins estaban al principio deseosos de entrar en contacto con pacientes que sufrieran trastornos musculares degenerativos para hacer que se beneficiaran de este descubrimiento, pero quedaron decepcionados al saber que la mitad de las llamadas telefónicas recibidas en su departamento procedían de culturistas que querían el gen para aumentar su propia musculatura, sin reparar en las consecuencias. Quizá fuera que estos culturistas estaban pensando en el enorme éxito de Arnold Schwarzenegger, que ha admitido haber usado esteroides para impulsar al principio su meteórica carrera. Dado el gran interés por el gen de la miostatina y los procedimientos para suprimirlo, el propio Comité Olímpico se vio obligado a formar una comisión especial para examinar esta cuestión. A diferencia de los esteroides, que son relativamente fáciles de detectar mediante pruebas químicas, este nuevo procedimiento presenta muchas más dificultades para su detección porque se trata de los genes, y de las proteínas que estos crean.

Los estudios realizados con gemelos idénticos que han sido separados al nacer muestran que existe una amplia variedad de rasgos de comportamiento influidos por la genética. De hecho, estos estudios señalan que aproximadamente el 50 por ciento del comportamiento de un gemelo está influido por los genes y el otro 50 por ciento lo está por el entorno. Estos rasgos incluyen la memoria, el razonamiento verbal, el razonamiento espacial, la velocidad de procesamiento, la extroversión y el afán de buscar emociones fuertes.

Incluso ciertos comportamientos que en otro tiempo se consideraban complejos están revelando ahora sus raíces genéticas. Por ejemplo, los ratones de campo son monógamos, mientras que los de laboratorio son promiscuos. Larry Young, de la Universidad Emory, sorprendió al mundo de la biotecnología demostrando que la transferencia de un gen de los ratones de campo podía hacer que los ratones de laboratorio mostraran tendencias monógamas. Cada animal tiene una versión diferente de cierto receptor que actúa para un péptido cerebral asociado con el comportamiento social y el emparejamiento. Young insertó el gen de los ratones de campo en los ratones de laboratorio y descubrió que estos se comportaban como los monógamos ratones de campo.

Young dijo: «Aunque muchos genes tienen una gran probabilidad de estar implicados en la evolución de comportamientos sociales complejos, como sería el caso de la monogamia… ciertos cambios en la expresión de un solo gen pueden incidir en la expresión de algunos componentes de dichos comportamientos, tales como el reconocimiento de la paternidad[10]».

La depresión y la felicidad pueden tener también raíces genéticas. Siempre se han conocido casos de personas que son felices aunque hayan sufrido accidentes trágicos. Son individuos que siempre ven el lado más positivo de las cosas, incluso cuando se enfrentan a contratiempos que podrían hundir a otros. Estas personas tienden también a tener mejor salud. El psicólogo de Harvard Daniel Gilbert me habló de una teoría

que podría explicar esto. Tal vez nacemos con un «nivel de felicidad preestablecido». Día a día podemos oscilar en torno a este nivel, pero está fijado en el momento del nacimiento. En el futuro, mediante fármacos o terapia génica, seremos capaces de desplazar este nivel preestablecido, lo cual será especialmente conveniente para los individuos que padezcan depresión crónica.

EFECTOS SECUNDARIOS DE LA REVOLUCIÓN BIOTÉCNICA

A mediados de siglo, los científicos serán capaces de aislar y modificar muchos de los genes individuales que controlan una amplia diversidad de características humanas. Pero esto no significa que la humanidad se beneficiará inmediatamente de estos avances. Está también el duro trabajo de hacer desaparecer los efectos secundarios y las consecuencias no deseadas, una tarea que llevará décadas.

Por ejemplo, Aquiles era invencible en el combate, y capitaneó a los victoriosos griegos en su épica batalla contra los troyanos. Sin embargo, tenía un punto débil que resultó fatal. Cuando era niño, su madre lo sumergió en el mágico río Estigia con el fin de volverlo invencible. Por desgracia, tuvo que sostenerlo por el talón mientras lo metía en el río, y a Aquiles le quedó este punto crucial de vulnerabilidad. Más tarde moriría durante la guerra de Troya tras ser alcanzado por una flecha en el talón.

Hoy en día, los científicos se preguntan si las nuevas cepas de criaturas surgidas de los laboratorios tienen también un talón de Aquiles oculto. Por ejemplo, actualmente hay unas treinta y tres cepas diferentes de «ratones inteligentes» que han mejorado su memoria y otras habilidades. Sin embargo, el hecho de mejorar la memoria ha tenido un efecto secundario inesperado: los ratones inteligentes se quedan a veces paralizados por el miedo. Por ejemplo, cuando se les aplica una descarga eléctrica extremadamente suave, tiemblan de terror. «Es como si recordaran en exceso», dice Alcino Silva, de la UCLA, que creó su propia cepa de ratones inteligentes[11]. Los científicos han constatado que, para comprender el mundo y organizar nuestro conocimiento, olvidar puede ser tan importante como recordar. Tal vez necesitemos eliminar muchos archivos para organizar nuestro conocimiento.

Esto nos recuerda un caso de la década de 1920, documentado por el neurólogo ruso A. R. Luria, relativo a un hombre que tenía memoria fotográfica. Después de leer una sola vez la *Divina Comedia* de Dante, había memorizado todas y cada una de las palabras de esta obra. Esto le era de gran ayuda en su trabajo de reportero de prensa, pero era incapaz de comprender figuras retóricas. Según Luria, «sus problemas de comprensión eran abrumadores: cada expresión daba lugar a una imagen que, a su vez, entraba en conflicto con otra imagen que había sido evocada[12]».

De hecho, los científicos creen que ha de haber un equilibrio entre olvidar y recordar[13]. Si se olvida en exceso, puede olvidarse el miedo a repetir errores del

pasado, pero también pueden olvidarse hechos y destrezas que son fundamentales. Si se recuerda demasiado, podrán recordarse detalles importantes, pero el individuo podría quedar paralizado por el recuerdo de todos los daños y reveses que ha sufrido. Solo una concesión mutua entre ambas facultades puede producir una comprensión óptima de la realidad.

Los culturistas están ya acudiendo en tropel a los distintos fármacos y terapias que les prometen fama y gloria. La hormona llamada eritropoyetina (EPO) actúa fabricando más glóbulos rojos, que contienen oxígeno, y esto significa que aumenta la resistencia. Dado que la EPO espesa la sangre, favorece también las apoplejías y los ataques cardíacos. Los factores de crecimiento insulínicos (FCI) son útiles porque contribuyen a que las proteínas rellenen los músculos, pero se han asociado con el crecimiento de tumores.

Aunque se aprueben leyes que prohíban la potenciación genética, esta será difícil de evitar. Por ejemplo, la evolución condiciona genéticamente a los progenitores para que deseen ofrecer todas las ventajas a sus hijos. Por una parte, esto supondría pagarles clases de violín, ballet y deportes. Pero, por otra parte, sería proporcionarles suplementos genéticos para mejorar su memoria, su capacidad de atención, su habilidad atlética y quizá incluso su aspecto físico. Si los progenitores averiguan que su hijo compite con el hijo del vecino, del que se rumorea que ha sido mejorado genéticamente, se sentirán obligados a proporcionar las mismas ventajas a su niño.

Como ha dicho Gregory Benford: «Todos sabemos que la gente guapa tiene éxito. ¿Qué padres podrían resistirse a ofrecer a su hijo una poderosa ayuda para enfrentarse a un mundo enormemente competitivo?»[14].

A mediados de siglo, las mejoras genéticas pueden convertirse en algo habitual. De hecho, podrían ser incluso indispensables si vamos a explorar el sistema solar y a vivir en planetas inhóspitos.

Algunos dicen que deberíamos utilizar genes de diseño para mejorar nuestra salud y ser más felices. Otros afirman que deberíamos permitir mejoras estéticas. La pregunta del millón es hasta dónde llegará esto. En cualquier caso, puede volverse cada vez más difícil controlar la difusión de «genes de diseño» que mejoren el aspecto físico y el rendimiento. No queremos que la especie humana se divida en distintas facciones genéticas, los mejorados y los no mejorados, pero la sociedad tendrá que decidir democráticamente hasta dónde hay que impulsar esta tecnología.

Personalmente, creo que se promulgarán leyes para regular esta poderosa tecnología, quizá para permitir la terapia génica cuando esta cure una enfermedad y nos permita tener unas vidas productivas, pero para restringir su uso cuando se quiera aplicar por razones meramente estéticas. Esto significa que podría generarse un mercado negro para soslayar las leyes, por lo que podríamos tener que adaptarnos a una sociedad en la que una pequeña parte de la población estaría mejorada genéticamente.

En general, esto no tendría por qué ser un desastre. Actualmente ya se puede utilizar la cirugía plástica para mejorar el aspecto físico, por lo que podría ser innecesario aplicar la ingeniería genética para conseguir lo mismo. Ahora bien, el peligro puede surgir cuando alguien intente cambiar genéticamente su propia personalidad. Probablemente hay muchos genes que influyen en la conducta y que interactúan de manera compleja, por lo que manipular los genes del comportamiento podría dar lugar a efectos secundarios no deseados. Es posible que transcurran décadas antes de que se puedan evitar todos estos efectos secundarios.

Pero ¿qué decir de la más importante de todas las mejoras genéticas, el alargamiento de la vida humana?

EL FUTURO LEJANO (DESDE 2070 HASTA 2100)

DAR MARCHA ATRÁS AL ENVEJECIMIENTO

A través de la historia los reyes y los señores de la guerra han tenido poder para gobernar grandes imperios, pero había una cosa que estaba siempre fuera de su control: el envejecimiento. Por consiguiente, la búsqueda de la inmortalidad ha sido un objetivo desde los tiempos más remotos de la historia de la humanidad.

En la Biblia, Dios expulsa a Adán y Eva del Jardín del Edén por desobedecer sus órdenes relativas a la manzana del conocimiento. Lo que Dios temía era que Adán y Eva pudieran utilizar ese conocimiento para descifrar el secreto de la inmortalidad y convertirse ellos mismos en dioses. En Génesis 3,22, la Biblia dice: «He aquí que el hombre ha llegado a ser como uno de nosotros en cuanto a conocer el bien y el mal; ahora bien, que no alargue su mano y tome también del árbol de la vida, y coma, y viva para siempre».

Aparte de la Biblia, uno de los relatos más antiguos y grandiosos de la civilización humana, que se remonta al siglo XXVII a. C., es el *Poema de Gilgamesh*, sobre este gran guerrero de Mesopotamia. Cuando su leal compañero de toda la vida murió de repente, Gilgamesh decidió emprender un viaje para encontrar el secreto de la inmortalidad. Le llegaron rumores de que los dioses habían concedido el don de la inmortalidad a un sabio y su esposa, que de hecho eran los únicos de su país que habían sobrevivido al gran diluvio. Tras una búsqueda épica, Gilgamesh halló finalmente el secreto de la inmortalidad, para terminar viendo cómo una serpiente se lo arrebataba en el último minuto.

Dado que el *Poema de Gilgamesh* es una de las obras más antiguas de la literatura universal, los historiadores creen que esta búsqueda de la inmortalidad inspiró al

escritor griego Homero para crear su *Odisea*, y fue también la inspiración para el diluvio de Noé narrado en la Biblia.

Muchos monarcas de la antigüedad, como el emperador Qin, que unificó la China hacia el año 200 a. C., enviaron enormes flotas navales para buscar el Manantial de la Eterna Juventud, pero todos fracasaron. (Según la mitología, el emperador Qin dio a su flota instrucciones de no regresar si no lograban encontrar dicho manantial. Desde luego, no pudieron hallarlo, pero les daba demasiado miedo volver y, en cambio, descubrieron Japón).

Durante décadas, la mayoría de los científicos creyeron que la duración de la vida estaba previamente fijada y era inmutable, quedando fuera del alcance de la ciencia. Durante estos últimos años, esta opinión se ha derrumbado ante la avalancha de resultados experimentales que han revolucionado este campo de la ciencia. La gerontología, que en otro tiempo fue una parcela de la ciencia dormida y remota, se ha convertido ahora en uno de los campos científicos más candentes, que atrae cientos de millones de dólares en fondos para la investigación e incluso plantea la posibilidad de un desarrollo comercial.

Los secretos del proceso de envejecimiento están empezando a desvelarse ahora, y la genética desempeñará un papel vital en este proceso. Si echamos un vistazo al reino animal, vemos que la duración de la vida presenta una gran variedad. Por ejemplo, nuestro ADN difiere del de nuestro pariente más cercano, el chimpancé, en solo el 1,5 por ciento, pero, sin embargo, nosotros vivimos un 50 por ciento más. Si analizamos los pocos genes que nos separan de los chimpancés, podemos determinar por qué vivimos mucho más que nuestro pariente genético.

A su vez, esto nos ha proporcionado una «teoría unificada del envejecimiento» que combina las diversas tendencias investigadoras en un único entramado coherente. Ahora los científicos saben qué es el envejecimiento: la acumulación de errores a nivel genético y celular. Estos errores pueden generarse de distintas maneras. Por ejemplo, el metabolismo crea radicales libres y produce una oxidación, lo cual daña la delicada maquinaria molecular de nuestras células, haciendo que estas envejezcan; los errores pueden surgir en forma de «chatarra» y residuos moleculares que se acumulan en el interior y el exterior de las células.

La formación de estos errores genéticos es un subproducto de la segunda ley de la termodinámica: la entropía total (es decir, el caos) siempre aumenta. Esta es la razón por la que la oxidación, la putrefacción, la desintegración, etcétera, son características universales de la vida. No se puede ir contra la segunda ley de la termodinámica. Absolutamente todo, desde las flores del campo hasta nuestros cuerpos, e incluso el propio universo, está condenado a marchitarse y morir.

Sin embargo, en la segunda ley de la termodinámica, que afirma que la entropía *total* siempre aumenta, hay una pequeña, pero importante, fisura, por la que, en cierto modo, se puede escapar. En realidad, es posible reducir la entropía en un lugar e invertir el envejecimiento, con tal de que aumentemos la entropía en algún otro sitio.

Por lo tanto, se puede rejuvenecer, siempre y cuando causemos estragos en otro punto. (A esto se refería Oscar Wilde en su famosa novela *El retrato de Dorian Gray*. El señor Gray, misteriosamente, se mantenía siempre joven. Pero su secreto era un retrato suyo que envejecía de manera horrible. Así, la cantidad total de envejecimiento no dejaba de aumentar). El principio de entropía puede verse también observando la parte de atrás de un frigorífico. Dentro del aparato la entropía disminuye a medida que desciende la temperatura. Sin embargo, para reducir la entropía se necesita un motor, que aumenta el calor generado en la parte posterior del frigorífico, haciendo crecer así la entropía en el exterior del aparato. Esta es la razón por la cual los frigoríficos siempre están calientes por la parte de atrás.

Como dijo en una ocasión el premio Nobel Richard Feynman: «Todavía no se ha encontrado en la biología nada que indique la inevitabilidad de la muerte. Esto me sugiere que no es del todo inevitable, y que solo es cuestión de tiempo que los biólogos descubran qué es lo que nos causa ese problema, y que esta terrible enfermedad universal, la temporalidad del cuerpo humano, se curará[15]».

La segunda ley de la termodinámica puede verse también en la actuación de la hormona sexual femenina llamada estrógeno, que mantiene a las mujeres jóvenes y llenas de vitalidad hasta que llegan a la menopausia, que es cuando el envejecimiento se acelera y aumenta la tasa de mortalidad. El estrógeno es como poner gasolina de muchos octanos en un coche deportivo. El coche rinde de maravilla, pero al precio de producir más desgaste y averías en el motor. En el caso de las mujeres, se sabe que este desgaste y este deterioro celular podría manifestarse en un cáncer de mama. De hecho, se sabe que las inyecciones de estrógenos aceleran el crecimiento de los tumores en el pecho. Por lo tanto, el precio que las mujeres han de pagar por la juventud y la vitalidad antes de la menopausia es posiblemente un aumento de la entropía total, en este caso un cáncer de mama. (Se han propuesto numerosas teorías para explicar el reciente aumento de las tasas de cáncer de mama, pero son aún muy controvertidas. Una de las teorías dice que esto está en parte relacionado con el número total de ciclos menstruales que tiene la mujer. Antiguamente, las mujeres estaban casi permanentemente embarazadas desde la pubertad hasta la menopausia, y luego no tardaban en morir. Esto significa que tenían pocos ciclos menstruales, niveles bajos de estrógenos, y puede que esta fuera la razón de que presentaran una tasa relativamente baja de cáncer de mama. Hoy en día, las mujeres llegan antes a la pubertad, tienen muchos ciclos menstruales, producen una media de 1,5 hijos, viven más allá de la menopausia, por lo que su exposición al estrógeno es mucho mayor, lo cual implica un posible aumento de los casos de cáncer de mama).

Recientemente se han descubierto una serie de seductoras claves relativas a los genes y el envejecimiento. En primer lugar, los investigadores han demostrado que es posible criar generaciones de animales que viven más tiempo de lo normal. En particular, las células de levadura, los gusanos nematodos y las moscas de la fruta pueden criarse en el laboratorio de modo que sus vidas sean más largas. La

comunidad científica se quedó asombrada cuando Michael Rose, de la Universidad de California en Irvine, anunció que podía alargar la vida de las moscas de la fruta en un 70 por ciento mediante una cría selectiva. Se descubrió que sus «supermoscas», o moscas Matusalén, tenían unas cantidades mayores del antioxidante llamado superóxido dismutasa (SOD), que puede frenar el deterioro producido por los radicales libres. En 1991, Thomas Johnson, de la Universidad de Colorado en Boulder, aisló un gen al que llamó edad-1. Este gen parece ser responsable del envejecimiento en los nematodos y aumenta su tiempo de vida en un 110 por ciento. «Si en los seres humanos existe algo parecido al gen edad-1, podríamos conseguir algo realmente espectacular», decía Johnson[16].

Actualmente, los científicos han aislado ya varios genes (edad-1, edad-2, daf-2) que controlan y regulan el proceso de envejecimiento en organismos inferiores, pero estos genes tienen también su contrapartida en los seres humanos. De hecho, un científico observó que modificar el tiempo de vida de las células de la levadura era casi igual que mover el interruptor para encender la luz. Cuando se activaba cierto gen, las células vivían más tiempo. Cuando se desactivaba, sus vidas eran más cortas.

Criar células de la levadura que vivan más tiempo es un procedimiento sencillo en comparación con la pesada tarea de criar seres humanos, cuyas vidas son tan largas que hacer pruebas es casi imposible. Sin embargo, el aislamiento de los genes responsables del envejecimiento podrá acelerarse en el futuro, especialmente cuando todos tengamos ya nuestros genomas en un CDROM. Entonces los científicos dispondrán de una gigantesca base de datos formada por miles de millones de genes que podrán ser analizados por ordenador. Se podrán cotejar millones de genomas de dos grupos de personas, los jóvenes y los viejos. Comparando ambos conjuntos, se podrá detectar dónde tiene lugar el envejecimiento a nivel genético. Una exploración preliminar de esos genes ha aislado ya unos sesenta en los que parece concentrarse el envejecimiento.

Por ejemplo, los científicos saben que la longevidad tiende a transmitirse de alguna manera en las familias. La gente que vive mucho tiempo suele tener padres que también fueron longevos. El efecto no es drástico, pero puede medirse. Los científicos que analizan gemelos idénticos separados al nacer también pueden ver esto a nivel genético. Sin embargo, nuestra esperanza de vida no está determinada al cien por cien por nuestros genes. Los científicos que han estudiado esto creen que nuestra esperanza de vida solo está determinada por los genes en un 35 por ciento. Así pues, en el futuro, cuando todo el mundo tenga su propio genoma personal de 100 dólares, se podrán explorar por ordenador los genomas de millones de personas con el fin de aislar los genes que controlan parcialmente la duración de nuestra vida.

Además, estos estudios realizados mediante ordenador pueden localizar con precisión dónde tiene lugar fundamentalmente el envejecimiento. En un coche, sabemos que el envejecimiento se produce principalmente en el motor, donde se prende y quema la gasolina. Del mismo modo, los análisis genéticos muestran que el

envejecimiento se concentra en el «motor» de la célula, que es la mitocondria, la planta energética de la célula. Esto les ha permitido a los científicos estrechar el campo de rastreo de los «genes de la edad» y buscar modos de acelerar la reparación de los genes en el interior de la mitocondria para invertir los efectos del envejecimiento.

En 2050 podría ser posible ralentizar el proceso de envejecimiento mediante diversas terapias, por ejemplo, las células madre, la tienda del cuerpo humano y la terapia génica para actuar sobre los genes del envejecimiento. Podríamos vivir 150 años o más. En 2100 quizá sea posible invertir los efectos del envejecimiento mediante la aceleración de los mecanismos de reparación celular, con lo que se podría vivir todavía mucho más.

RESTRICCIÓN CALÓRICA

Esta teoría puede explicar también el extraño hecho de que la restricción calórica (es decir, reducir las calorías que ingerimos en un 30 por ciento o más) aumenta el tiempo de vida en un 30 por ciento. Todos los organismos estudiados hasta ahora presentan este extraño fenómeno, desde las células de la levadura, las arañas y los insectos en general, hasta los conejos, los perros y ahora los monos. Los animales sometidos a esta estricta dieta tienen menos tumores, menos enfermedades cardíacas, una menor incidencia de diabetes y menos enfermedades relacionadas con el envejecimiento. De hecho, la restricción calórica es el *único* mecanismo conocido que garantiza un alargamiento de la duración de la vida y que ha sido comprobado repetidamente en casi todo el reino animal, viéndose que siempre funciona. Hasta hace poco, la única especie importante que los investigadores de la restricción calórica habían evitado era la de los primates, a la cual pertenecen los seres humanos, y el motivo era la larga duración de la vida de esta especie.

Los científicos estaban especialmente ansiosos por ver los resultados de la restricción calórica en los monos rhesus. Finalmente, en 2009 llegaron los resultados tanto tiempo esperados[17]. El estudio de la Universidad de Wisconsin puso de manifiesto que, tras veinte años de restricción calórica, los monos que habían seguido la dieta sufrían en todos los aspectos menos enfermedades: menos diabetes, menos cáncer, menos enfermedades cardíacas. En general, aquellos monos tenían mejor salud que los que habían seguido una dieta normal.

Hay una teoría que podría explicar esto: la naturaleza da a los animales dos «opciones» en cuanto a cómo utilizan ellos su energía. En épocas de abundancia, la energía se utiliza para la reproducción. En épocas de hambre, el cuerpo suspende la reproducción, conserva sus energías e intenta sobrevivir a la escasez. En el reino animal la situación de estar a punto de morir de hambre es algo corriente, por lo que los animales con frecuencia eligen la «opción» de suprimir la reproducción, poner su

metabolismo a un ritmo lento, seguir viviendo y esperar a que lleguen tiempos mejores.

El milagro que busca la investigación sobre el envejecimiento consiste en aprovechar de algún modo las ventajas de la restricción calórica sin el bajón correspondiente (morir de hambre). Aparentemente, la tendencia natural de los seres humanos es aumentar de peso, no perderlo. De hecho, vivir con una dieta restringida en calorías no es un placer; se trata de una dieta que daría náuseas a un ermitaño. También los animales sometidos a una dieta especialmente severa y restrictiva se vuelven letárgicos, perezosos y pierden todo interés por el sexo. Lo que motiva a los científicos es la búsqueda de un gen que controle este mecanismo, de tal modo que podamos disfrutar de los beneficios de la restricción calórica sin el bajón que esta produce.

Una clave importante fue lo que descubrieron en 1991 el investigador del MIT Leonard P. Guarente y otros, cuando estaban buscando un gen que pudiera alargar la duración de la vida de las células de la levadura. Guarente, junto con David Sinclair, de Harvard, y otros colaboradores descubrieron el gen SIR2, que interviene en la aparición de los efectos de la restricción calórica. Este gen es responsable de detectar las reservas energéticas de las células. Cuando dichas reservas están bajas, como sucede cuando hay hambre, este gen se activa. Esto es precisamente lo que se podría esperar de un gen que controla los efectos de la restricción calórica. También descubrieron que el SIR2 tiene su contrapartida en los ratones y las personas: los genes SIRT, que producen unas proteínas llamadas sirtuinas. A continuación, buscaron sustancias químicas que activaran las sirtuinas y descubrieron el resveratrol.

Todo esto resultaba intrigante, porque los científicos creían también que el resveratrol podía ser responsable de los beneficios del vino tinto y explicaría la «paradoja francesa». La cocina francesa es famosa por sus sabrosas salsas, que son ricas en grasas y aceites, pero, sin embargo, los franceses parecen tener unas vidas de duración normal. Tal vez la explicación de este misterio sea que los franceses consumen mucho vino tinto, y este contiene resveratrol.

Los científicos han descubierto que los activadores de la sirtuina pueden proteger a los ratones contra una impresionante variedad de enfermedades, como los cánceres de pulmón y colon, el melanoma, el linfoma, la diabetes de tipo 2, las enfermedades cardiovasculares y la enfermedad de Alzheimer, según afirma Sinclair[18]. Si tan solo una pequeña parte de estas enfermedades pudiera ser tratada en los humanos mediante sirtuinas, esto revolucionaría toda la medicina.

Recientemente se ha propuesto una teoría para explicar las notables propiedades del resveratrol. Según Sinclair, la función principal de la sirtuina es impedir que ciertos genes se activen. Por ejemplo, los cromosomas de una sola célula, si se estiran completamente, cubrirían una longitud de unos 180 centímetros, lo que constituye una molécula astronómicamente larga. En cualquier momento solo se necesita una parte de los genes que hay a lo largo de estos 180 centímetros de cromosomas; los

demás genes han de estar inactivos. La célula amordaza la mayor parte de los genes que no son necesarios, envolviendo el cromosoma con cromatina, que está garantizada por la sirtuina.

Sin embargo, a veces se producen unos trastornos catastróficos de estos delicados cromosomas, como puede ser la ruptura total de una de las cuerdas. Entonces las sirtuinas entran rápidamente en acción, ayudando a reparar el cromosoma roto. Pero, cuando las sirtuinas abandonan temporalmente sus puestos de trabajo para acudir al rescate, han de interrumpir su tarea fundamental de silenciar a los genes. Por consiguiente, los genes se activan, produciendo un caos genético. Sinclair plantea que esta interrupción es uno de los principales mecanismos del envejecimiento.

Si esto es cierto, tal vez las sirtuinas puedan no solo detener el avance del envejecimiento, sino también invertirlo. El daño sufrido por el ADN en nuestras células es difícil de reparar e invertir. Pero Sinclair cree que en gran parte nuestro envejecimiento lo causan las sirtuinas que han sido desviadas de su tarea fundamental, dejando que las células degeneren. Afirma que la desviación de estas sirtuinas puede invertirse fácilmente.

¿LA FUENTE DE LA ETERNA JUVENTUD?

Sin embargo, un subproducto no deseado de este descubrimiento ha sido el circo mediático que ha desencadenado. De repente *60 Minutes* y *The Oprah Winfrey Show* se pusieron a hablar del resveratrol, provocando una estampida en internet, donde empresas poco fiables aparecieron de la noche a la mañana prometiendo el elixir de la vida. Parece como si todos los charlatanes y vendedores de aceite de serpiente quisieran subirse al tren del resveratrol.

Tuve ocasión de entrevistar en su laboratorio a Guarente, el hombre que inició esta estampida mediática. Fue cauto en sus declaraciones, porque era consciente del impacto mediático de sus hallazgos y de los malentendidos que podían suscitar. En particular, estaba furioso por el hecho de que tantos sitios de internet estuvieran anunciando el resveratrol como una especie de fuente de la eterna juventud. Observó que le parecía horroroso que algunos intentaran beneficiarse económicamente de la repentina fama que había conseguido el resveratrol, aunque la mayor parte de los resultados fueran todavía meras tentativas. No obstante, no descartaba la posibilidad de que algún día, si se encontraba la fuente de la eterna juventud, suponiendo que algo así existiera, el SIR2 pudiera desempeñar un papel importante. De hecho, su colega Sinclair reconoce que se toma grandes cantidades de resveratrol todos los días[19].

El interés que suscita la investigación sobre el envejecimiento es tan intenso dentro de la comunidad científica que la Facultad de Medicina de Harvard patrocinó en 2009 un congreso al que acudieron algunos de los investigadores más notables de

este campo. Entre la audiencia había muchas personas que, por iniciativa propia, estaban sometidas a la restricción calórica. Con su aspecto demacrado y frágil, ponían a prueba su filosofía científica restringiendo la ingesta. También había miembros del 120 Club, que se caracterizan por pretender vivir hasta los ciento veinte años. Concretamente, el interés se centró en Sirtris Pharmaceuticals, fundada de manera conjunta por David Sinclair y Christoph Westphal, que ahora está sometiendo a pruebas clínicas algunos de sus sucedáneos del resveratrol. Westphal afirma categóricamente: «Dentro de cinco, seis o siete años, habrá medicamentos que mejorarán la longevidad[20]».

Sustancias químicas que ni siquiera existían hace pocos años son ahora objeto de un vivo interés cuando se someten a prueba. El SRT501 se está probando como tratamiento contra el mieloma múltiple y el cáncer de colon. El SRT2104 se está probando contra la diabetes de tipo 2. No solo las sirtuinas, sino también una legión de genes, proteínas y otras sustancias químicas (incluidos el factor de crecimiento insulínico I, o FCI-1, el TOR y la rapamicina) están siendo analizados minuciosamente por diversos grupos de científicos.

Solo el tiempo dirá si estas pruebas clínicas tendrán éxito. La historia de la medicina está plagada de episodios de engaños, argucias y fraudes cuando se trata del proceso de envejecimiento. Pero la ciencia, no la superstición, se basa en datos reproducibles, comprobables y refutables. Cuando el Instituto Nacional de Envejecimiento establezca programas para comprobar los efectos de diversas sustancias sobre el envejecimiento, veremos si esos intrigantes estudios realizados con animales son extrapolables a los seres humanos.

¿ES INEVITABLE QUE MURAMOS?

El pionero de la biotecnología William Haseltine me dijo en una ocasión: «Lo natural en la vida no es la mortalidad, sino la inmortalidad. El ADN es una molécula inmortal. Esta molécula apareció por primera vez hace miles de millones de años, quizá entre 3.000 y 5.000 millones. Esa mismísima molécula, por duplicación, existe aún hoy en día… Es verdad que se nos acaba la cuerda, pero hemos hablado del proyecto de ser capaces de modificar esto en el futuro. En primer lugar, prolongar la duración de nuestra vida multiplicándola por dos o por tres. Y quizá, si llegamos a comprender bien el cerebro, hacer que tanto este como el cuerpo entero duren indefinidamente. Y no creo que eso vaya a ser un proceso antinatural».

Los biólogos expertos en la evolución señalan que la presión evolutiva se ejerce sobre los animales durante sus años fértiles. Cuando un animal ha pasado ya sus años reproductivos, puede convertirse de hecho en una carga para el grupo, y quizá es por eso por lo que la evolución ha programado que muera de vejez. En consecuencia, tal

vez estemos programados para morir. Pero quizá sea también posible que podamos reprogramarnos a nosotros mismos para vivir más tiempo.

En realidad, si nos fijamos, por ejemplo, en los mamíferos, vemos que cuanto mayor es el tamaño del animal, más bajo es su índice metabólico y más larga es su vida. Los ratones, por ejemplo, queman una cantidad de alimentos que es enorme si se tiene en cuenta su peso corporal, y viven solo unos cuatro años. Los elefantes poseen un metabolismo mucho más lento y viven hasta los setenta años. Si el metabolismo se corresponde con la generación de errores, esto concuerda aparentemente con la idea de que un organismo vive más tiempo si su índice metabólico es más bajo. (Esto puede explicar la expresión «encender una vela por los dos extremos[*]». Una vez leí un relato breve sobre un genio que le ofreció a un hombre el cumplimiento de cualquier deseo que este formulase. El hombre se apresuró a decir que deseaba vivir mil años. El genio le concedió el deseo y convirtió al hombre en árbol).

Los expertos en biología evolutiva intentan explicar la duración de la vida en términos de cómo la longevidad puede ayudar a una especie a sobrevivir en el medio natural. Para ellos cualquier duración específica de la vida está determinada genéticamente porque contribuye a que la especie sobreviva y se propague. Desde su punto de vista, los ratones tienen una vida tan breve porque hay toda una diversidad de depredadores que los cazan y porque, a menudo, estos roedores se hielan de frío en invierno. Los ratones que transmiten sus genes a la generación siguiente son aquellos que tienen más descendencia, no los que viven más tiempo. (Si esta teoría es correcta, sería de esperar que los ratones que consiguen de algún modo huir de los depredadores vivieran más tiempo. De hecho, los murciélagos, que son del mismo tamaño que los ratones, viven entre 3 y 5 veces más).

Pero en el caso de los reptiles se observa una anomalía. Aparentemente, algunos reptiles no tienen una duración de vida conocida. Incluso podrían vivir para siempre. Los caimanes y los cocodrilos se limitan a hacerse cada vez más grandes, pero siempre están igual de vigorosos y tienen la misma energía. (A menudo, los libros de texto afirman que los caimanes viven solo hasta los setenta años de edad. Pero esto quizá se deba a que el trabajador del zoológico murió a los setenta años. Otros libros de texto son más honestos y se limitan a decir que la duración de la vida de estos animales es de más de setenta años, pero nunca se ha podido medir con precisión en condiciones de laboratorio). En realidad, estos animales no son inmortales, porque mueren a causa de accidentes, hambre, enfermedad, etcétera. Sin embargo, si están en un zoológico, sus vidas tienen una duración enorme, por lo que casi parece que viven eternamente.

EL RELOJ BIOLÓGICO

Otro asunto clave e intrigante es el de los telómeros de las células, que actúan como un «reloj biológico». Al igual que los remates de plástico que tiene en sus extremos un cordón de zapato, los telómeros se encuentran en los extremos de los cromosomas. Después de cada ciclo reproductivo se van haciendo cada vez más cortos. Finalmente, tras unas sesenta reproducciones (para las células de la piel), los telómeros se deshacen. La célula entra entonces en su senectud y deja de realizar sus tareas correctamente. Los telómeros son como la mecha en un cilindro de dinamita. Si la mecha se queda cada vez más corta después de cada ciclo reproductivo, finalmente acaba desapareciendo, y la célula deja de reproducirse.

Esto se llama el límite de Hayflick y, al parecer, pone un tope máximo al ciclo vital de ciertas células. Las células cancerosas, por ejemplo, no tienen límite de Hayflick y producen una enzima llamada telomerasa que impide que los telómeros se acorten cada vez más.

La telomerasa es una enzima que puede sintetizarse. Cuando se aplica a las células de la piel, estas aparentemente se reproducen indefinidamente. Se vuelven inmortales.

Sin embargo, esto tiene un riesgo. Las células cancerosas también son inmortales, y se duplican ilimitadamente en un tumor. De hecho, esta es la razón por la que las células cancerosas son tan letales: se reproducen sin límite, hasta que el cuerpo ya no puede funcionar. Por lo tanto, la telomerasa es una enzima que ha de ser analizada minuciosamente. Cualquier terapia que implique el uso de la telomerasa para dar cuerda al reloj biológico debe ser controlada para tener la seguridad de que no produce cáncer.

INMORTALIDAD MÁS JUVENTUD

La perspectiva de aumentar la duración de la vida humana es fuente de alegría para algunos y un horror para otros, ya que supone una explosión demográfica y una sociedad de ancianos decrépitos, todo lo cual llevaría el país a la ruina.

Una combinación de terapias biológicas, mecánicas y nanotecnológicas podría, de hecho, no solo alargar la duración de nuestras vidas, sino también hacer que conserváramos la juventud durante el proceso. Robert A. Freitas Jr., que aplica la nanotecnología a la medicina, ha dicho: «Estas intervenciones pueden convertirse en algo corriente dentro de unas pocas décadas. Mediante revisiones y limpiezas anuales, junto con algunas reparaciones importantes ocasionales, nuestra edad biológica podría restaurarse una vez al año para mantener la edad fisiológica más o menos constante que se elija. Podríamos morir finalmente por causas accidentales, pero viviríamos al menos diez veces más tiempo que ahora[21]».

En el futuro, aumentar la duración de la vida no se logrará bebiendo de la mítica fuente de la eterna juventud. Lo más probable es que se logre por una combinación de

varios métodos:

1. crear nuevos órganos cuando los antiguos se desgastan o enferman, utilizando la ingeniería de tejidos y las células madre;
2. ingerir un cóctel de proteínas y enzimas diseñadas para potenciar los mecanismos de reparación celular, regular el metabolismo, poner en hora el reloj biológico y reducir la oxidación;
3. utilizar la terapia génica para modificar los genes que pueden frenar el proceso de envejecimiento;
4. mantener un estilo de vida saludable (ejercicio y dieta sana);
5. utilizar nanosensores para detectar enfermedades como el cáncer años antes de que se conviertan en un problema.

POBLACIÓN, ALIMENTOS Y CONTAMINACIÓN

Pero hay una cuestión que se plantea constantemente: Si la esperanza de vida puede aumentarse, ¿sufriremos una superpoblación? Nadie lo sabe.

Retrasar el proceso de envejecimiento tiene una cantidad enorme de repercusiones sociales. Si vivimos más tiempo, ¿no llegaremos a superpoblar el planeta? Sin embargo, algunos señalan que el gran aumento en la duración de la vida ya se ha producido al dispararse la esperanza de vida desde los cuarenta y cinco hasta los setenta u ochenta años en solo un siglo. En vez de generar una explosión demográfica, se puede decir que esto ha producido el efecto contrario. Como la gente vive más tiempo, se dedica más a las carreras profesionales y retrasa la procreación. De hecho, la población nativa europea está decreciendo drásticamente. Si las personas viven unas vidas más largas y más ricas, pueden tener menos hijos y espaciar más su llegada. Si va a vivir muchas más décadas, la gente establecerá sus marcos temporales en consonancia con esa larga duración de la vida y, por lo tanto, espaciará o retrasará la llegada de los hijos.

Otros afirman que la gente rechazará esta tecnología porque es antinatural y puede ir en contra de sus creencias religiosas. De hecho, unas encuestas informales realizadas a la población en general ponen de manifiesto que una gran mayoría piensa que la muerte es un hecho bastante natural y contribuye a dar sentido a la vida. (Sin embargo, la mayoría de la gente entrevistada en esas encuestas es joven o de mediana edad. Si se realizara la misma encuesta en una clínica donde la gente se está consumiendo, vive con dolores constantes y espera la muerte, las respuestas podrían ser completamente diferentes).

Como dice Greg Stock, de la UCLA: «Gradualmente, nuestras ansias de ser como Dios y nuestra preocupación por alargar la duración de la vida darían paso a un nuevo

coro: “¿Cuándo me dan una píldora?”[22]».

En 2002, con unos datos demográficos inmejorables, los científicos calcularon que el 6 por ciento de todos los seres humanos que han pisado alguna vez la superficie terrestre están todavía vivos[23]. Esto se debe a que la población humana del planeta osciló en torno a 1.000 millones de habitantes durante la mayor parte de su historia. La necesidad de rebuscar los escasos alimentos hizo que la población humana se mantuviera en unas cifras muy bajas. Incluso cuando estaba en su mayor auge, la población del Imperio romano no pasó de 55 millones de habitantes.

Sin embargo, durante los últimos 300 años se ha producido un enorme ascenso de la población mundial, coincidiendo con los avances de la medicina moderna y la revolución industrial, que produjo una gran abundancia de alimentos y suministros en general. En el siglo XX, la población mundial alcanzó cotas aún más altas, llegando a más que duplicarse entre 1950 y 1992: desde 2.500 millones hasta 5.500 millones. Actualmente se sitúa en 6.700 millones. Anualmente se suman 79 millones de personas a la especie humana[24], lo cual representa más que toda la población de Francia.

Se han hecho muchas predicciones apocalípticas, pero hasta ahora la humanidad ha podido mantenerse a flote. Remontándonos a 1798, Thomas Malthus advirtió de lo que podría suceder cuando la población llegara a ser excesiva para la cantidad de alimentos disponibles. Las hambrunas, las revueltas para conseguir alimentos, la caída de los gobiernos y la mortandad masiva por hambre no dejarían de producirse hasta que se restableciera el equilibrio entre población y recursos. Dado que los recursos alimentarios crecen con el tiempo de forma lineal, mientras que la población lo hace de forma exponencial, parecía inevitable que, en algún momento, el mundo llegara a una situación crítica. Malthus predijo grandes hambrunas para mediados del siglo XIX.

Pero en el siglo XIX la población mundial se encontraba en los inicios de una expansión importante, porque, tras el descubrimiento de nuevas tierras, se fundaron colonias, aumentó el suministro de alimentos, etcétera, con lo que la predicción de Malthus nunca se hizo realidad.

En la década de 1960 se formuló otra predicción malthusiana según la cual pronto se produciría una gran explosión demográfica, previéndose un colapso global para el año 2000. Esta predicción era errónea. La revolución verde consiguió ampliar el suministro de alimentos. Los datos muestran que el aumento de recursos alimentarios excedía el crecimiento de la población mundial, echando por tierra temporalmente la lógica de Malthus. De 1950 a 1984, la producción de grano aumentó más de un 250 por ciento, debido principalmente a los nuevos fertilizantes y la nueva tecnología agropecuaria.

Una vez más, nos libramos del desastre. Pero ahora la expansión demográfica está en pleno auge, y algunos dicen que estamos llegando al límite de la capacidad del planeta para generar recursos alimentarios.

Resulta inquietante constatar que la producción de alimentos empieza a perder gas, tanto por lo que respecta a la producción mundial de grano como a los alimentos extraídos de los océanos. Las autoridades científicas del gobierno del Reino Unido advierten de la llegada de una tormenta perfecta que combinará la explosión demográfica con el descenso de los recursos alimentarios y energéticos en 2030. Según la FAO, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, en 2050 el mundo tendrá que producir un 70 por ciento más de alimentos con el fin de alimentar a los 2.300 millones de personas más que habrá en el planeta, y, si no lo consigue, se enfrentará al desastre.

Estas proyecciones pueden infravalorar la auténtica dimensión del problema. Los cientos de millones de personas de China y de la India que accederán a la clase media querrán disfrutar de todos los lujos que han visto en las películas de Hollywood (como tener dos coches, casas espaciosas en las afueras, hamburguesas y patatas fritas, etc.), y eso puede agotar los recursos mundiales. De hecho, Lester Brown, uno de los más importantes expertos en medio ambiente y fundador del Instituto World Watch en Washington D. C., me comentó la posibilidad de que el planeta no pudiera soportar el esfuerzo de proporcionar un estilo de vida de clase media a tantos cientos de millones de personas.

UN POCO DE ESPERANZA PARA LA POBLACIÓN MUNDIAL

No obstante, hay algunos rayos de esperanza. El control de la natalidad, que en otro tiempo era un tema tabú, se ha afianzado en el mundo desarrollado y está abriéndose camino en los países en vías de desarrollo.

En Europa y Japón vemos una implosión, no explosión, de la población. La tasa de natalidad ha descendido hasta situarse entre 1,2 y 1,4 hijos por familia en algunos países europeos, muy lejos del 2,1, que daría el nivel de reemplazo. Japón sufre un problema triple. En primer lugar, tiene la población de envejecimiento más rápido de todo el planeta. Por ejemplo, durante más de veinte años las mujeres japonesas han batido el récord porque tienen la mayor esperanza de vida de todos los grupos humanos. En segundo lugar, la tasa de natalidad es muy baja. Y, en tercer lugar, el gobierno hace que la inmigración se mantenga extremadamente baja. Estos tres factores demográficos amenazan con hacer descarrilar un tren que va muy lento. Y Europa no está lejos de llegar a la misma situación.

De esto se deduce que el mejor anticonceptivo del mundo es la prosperidad. En el pasado, los campesinos, que carecían de planes de jubilación y seguridad social, intentaban tener tantos hijos como podían para que trabajaran los campos y les cuidaran en la vejez. Se limitaban a hacer un simple cálculo: cada nuevo hijo que llegaba a la familia significaba más brazos para trabajar, más ingresos y más gente para atenderles en la vejez. Sin embargo, cuando un campesino accede a la clase

media, y dispone de prestaciones por jubilación y un estilo de vida confortable, el cálculo pasa a ser todo lo contrario: cada hijo reduce los ingresos y la calidad de vida.

En el Tercer Mundo se plantea el problema contrario: una población que crece rápidamente, con una gran mayoría menor de veinte años. Incluso allí donde se espera que la explosión demográfica sea máxima, en Asia y el África subsahariana, la tasa de natalidad ha estado descendiendo por razones diversas.

En primer lugar, está la rápida urbanización de la población campesina, ya que los granjeros dejan las tierras de sus antepasados para probar suerte en las grandes ciudades. En 1800, solo el 3 por ciento de la población vivía en las ciudades. A finales del siglo XX, esta cifra aumentó al 47 por ciento, y se espera que supere este valor en las próximas décadas. Los gastos de criar un hijo en la ciudad reducen drásticamente el número de hijos por familia. Como los alquileres, los alimentos y los gastos en general son tan caros, los trabajadores que viven en los barrios pobres de las grandes ciudades hacen el mismo cálculo y llegan a la conclusión de que cada hijo reduce sus posibilidades económicas.

En segundo lugar, a medida que se industrializan los países, como es el caso de China y la India, se crea una clase media que desea menos hijos, al igual que en el Occidente industrializado. Y, en tercer lugar, la educación de las mujeres, incluso en países pobres como Bangladesh, ha creado un tipo de mujer que desea menos hijos. Debido a la implantación de un plan educativo extensivo, la tasa de natalidad ha descendido en Bangladesh del 7 al 2,7, aunque allí no se haya producido una urbanización o una industrialización a gran escala.

A la vista de todos estos factores, la ONU ha estado revisando continuamente sus cifras de crecimiento demográfico para el futuro. Los cálculos aún varían, pero la población mundial podría llegar a 9.000 millones en 2040. Aunque las cifras de población seguirán aumentando, la tasa de crecimiento irá reduciéndose hasta que dichas cifras finalmente se estabilicen. Desde un punto de vista optimista, puede incluso que se estabilicen en torno a los 11.000 millones en 2100.

Lo normal sería considerar que esto va más allá de la capacidad del planeta. Sin embargo, todo depende de cómo se defina esa capacidad, porque entretanto podría producirse otra revolución verde.

Una posible solución para algunos de estos problemas es la biotecnología. En Europa los alimentos producidos aplicando la bioingeniería se han ganado una mala reputación que puede durar toda una generación. La industria biotecnológica vendió a los granjeros herbicidas y, al mismo tiempo, cultivos resistentes a los herbicidas. Para la industria biotecnológica esto supuso más ventas, pero para el consumidor significó más venenos en su comida, y el mercado llegó rápidamente a un desplome.

Sin embargo, en el futuro pueden entrar en el mercado algunos granos del tipo del «súper arroz», es decir, cultivos tratados específicamente mediante ingeniería para crecer en medios secos, hostiles y áridos. Por razones éticas, será difícil oponerse a la

introducción de cultivos que son seguros y pueden alimentar a cientos de millones de personas.

RESURRECCIÓN DE FORMAS DE VIDA EXTINTAS

Sin embargo, otros científicos no están tan interesados en prolongar la vida humana y burlar la muerte. Lo que les interesa es recuperar criaturas que ya están muertas.

En la película *Parque Jurásico*, unos científicos extraen ADN de los dinosaurios, lo insertan en huevos de reptiles y hacen que los dinosaurios vuelvan a la vida. Aunque hasta la fecha nunca se ha encontrado ADN de dinosaurios que pueda ser utilizable, hay sorprendentes indicios de que este sueño no es del todo inverosímil. A finales de este siglo, nuestros zoológicos pueden estar llenos de criaturas que dejaron de caminar por la superficie terrestre hace miles de años.

Como se ha dicho anteriormente, Robert Lanza dio el primer paso relevante clonando el banteng, una especie en peligro de extinción. En su opinión, sería una vergüenza que este buey tan raro se extinguiera. En consecuencia, está sopesando otra posibilidad: crear un nuevo animal clonado, pero del sexo opuesto. En los mamíferos el sexo de un organismo está determinado por los cromosomas X e Y. Lanza confía en que, jugando con estos cromosomas, podrá clonar otro animal a partir de este esqueleto, solo que en este caso será del sexo opuesto. De esta manera, en los zoológicos de todo el mundo se podrá ver cómo animales de especies extinguidas hace mucho tiempo tienen crías.

En una ocasión cené con Richard Dawkins, de la Universidad de Oxford, que va un paso más allá. Este científico, autor de *El gen egoísta*, especula con la posibilidad de que un día seamos capaces de resucitar toda una variedad de formas de vida que no están precisamente en peligro de extinción, sino que se extinguieron hace mucho tiempo. En primer lugar, Dawkins observa que cada veintisiete meses se duplica el número de genes que han sido secuenciados. Así pues, calcula que en las próximas décadas solo costará 160 dólares secuenciar el genoma de cualquier persona. Prevé un tiempo en que los biólogos llevarán consigo un pequeño equipo para, en unos pocos minutos, poder secuenciar el genoma completo de cualquier forma de vida con la que se encuentren.

Pero Dawkins va aún más lejos y plantea la hipótesis de que en 2050 podremos construir un organismo entero a partir solamente del genoma. Escribe lo siguiente: «Creo que en 2050 podremos leer el lenguaje [de la vida]. Introduciremos el genoma de un animal desconocido en un ordenador que reconstruirá, no solo la forma del animal, sino también, y con todo detalle, el mundo en que sus antepasados… vivían, incluidos sus depredadores o sus presas, sus parásitos o sus parasitados, sus lugares de nidificación o sus guaridas, e incluso sus esperanzas y sus temores[25]». Citando la

obra de Sydney Brenner, Dawkins cree que podremos reconstruir el genoma del «eslabón perdido» entre los humanos y los monos.

Este sería un avance realmente notable. A juzgar por las pruebas fósiles y del ADN, nosotros nos separamos de los monos hace seis millones de años.

Dado que nuestro ADN difiere del de los chimpancés tan solo en un 1,5 por ciento, en el futuro un programa informático podría analizar nuestro ADN y el de un chimpancé, para luego aproximar matemáticamente el ADN de aquel antepasado común del que nacieron ambas especies. Una vez que el hipotético genoma de nuestro antepasado común está reconstruido, un programa informático nos dará una reconstrucción visual del aspecto que dicho antepasado tenía, así como de sus características. Dawkins llama a esto el Proyecto Genoma de Lucy, tomando el nombre del célebre fósil de un australopiteco.

Dawkins llega incluso a formular la teoría de que, una vez que el genoma del eslabón perdido se ha recreado matemáticamente mediante un programa informático, sería posible crear realmente el ADN de este organismo, implantarlo en un óvulo humano e insertar este óvulo en una mujer, que después dará a luz a nuestro antepasado.

Aunque este montaje se habría descartado por absurdo hace solo unos pocos años, varios acontecimientos indican que no es un sueño tan descabellado.

En primer lugar, el reducido número de genes decisivos que nos separan de los chimpancés están siendo analizados ahora con todo detalle. Un candidato interesante es el gen ASPM, que es el responsable de controlar el tamaño del cerebro. El cerebro humano aumentó de tamaño hace varios millones de años por razones que no se conocen. Cuando este gen sufre una mutación, produce microcefalia, una malformación en la que el cráneo es pequeño y el cerebro está reducido al 70 por ciento, más o menos el tamaño del de nuestro antepasado de hace millones de años. Curiosamente, es posible analizar la historia de este gen utilizando ordenadores. Los análisis muestran que ha mutado quince veces durante los últimos cinco o seis millones de años, desde que nos separamos de los chimpancés, lo cual coincide con el aumento del tamaño de nuestro cerebro. Resulta intrigante el hecho de que, en comparación con nuestros primos primates, los seres humanos somos los que hemos experimentado un índice de cambio más veloz por lo que respecta a este gen decisivo.

Aún más interesante es la región llamada HAR1 del genoma (*human accelerated region*: región humana acelerada[26]), que contiene solo 118 letras. En 2004 se descubrió que la diferencia crucial entre los chimpancés y los humanos en esta región del genoma es de solo 18 letras, o ácidos nucleicos. Los chimpancés y los pollos divergieron hace nada menos que 300 millones de años y, sin embargo, sus pares de bases en la HAR1 difieren solo en dos letras. Lo que esto significa es que la HAR1 ha sido notablemente estable durante toda la historia de la evolución hasta la aparición de los seres humanos. Por lo tanto, es posible que los genes que nos hacen humanos estén contenidos ahí.

Pero hay un acontecimiento aún más espectacular que hace que la propuesta de Dawkins parezca factible. La totalidad del genoma de nuestro pariente genético más cercano, el neandertal, que se extinguió hace mucho tiempo, se ha secuenciado ahora. Tal vez mediante el análisis por ordenador de los genomas de humanos, chimpancés y neandertales, podría reconstruirse el genoma del eslabón perdido.

¿LA RESURRECCIÓN DEL NEANDERTAL?

Los seres humanos y los neandertales divergieron probablemente hace unos 300.000 años. Pero estas criaturas se extinguieron en Europa hace unos 30.000 años. Por esta razón, durante mucho tiempo se pensó que era imposible extraer algo de ADN utilizable de aquellos neandertales que murieron hace tantos miles de años.

Sin embargo, en 2009 se anunció que un equipo dirigido por Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig, había publicado un primer esbozo del genoma completo de un neandertal, analizando el ADN de seis neandertales. Fue un logro monumental. Como era de esperar, el genoma del neandertal era muy parecido al genoma humano, ya que ambos contenían 3.000 millones de pares de bases, pero también era diferente en aspectos fundamentales.

El antropólogo Richard Klein, de Stanford, dijo a propósito del trabajo de Pääbo y sus colegas que aquella reconstrucción podría dar la respuesta a viejas preguntas sobre el comportamiento de los neandertales, como, por ejemplo, si eran capaces de hablar. Los seres humanos tienen dos cambios específicos en el gen FOXP2, que, en parte, nos permite hablar miles de palabras. Un análisis minucioso muestra que el neandertal tenía los mismos cambios genéticos en su gen FOXP2. Por lo tanto, se puede pensar que el neandertal podría haber sido capaz de vocalizar de manera similar a como nosotros lo hacemos.

Dado que los neandertales fueron nuestros parientes genéticos más cercanos, son objeto de un enorme interés entre los científicos. Algunos han planteado la posibilidad de reconstruir un día el ADN de los neandertales e insertarlo en un óvulo, que algún día podría convertirse en un neandertal vivo. Así pues, al cabo de miles de años el neandertal podría algún día volver a caminar sobre la superficie de la Tierra.

George Church, de la Facultad de Medicina de Harvard, llegó incluso a calcular que traer a los neandertales de nuevo a la vida solo costaría 30 millones de dólares, e incluso expuso un plan para hacerlo. Primero se procedería a dividir todo el genoma humano en porciones, con 100.000 pares de ADN en cada porción. Cada una se insertaría en una bacteria y luego se modificaría genéticamente, de tal modo que el genoma coincidiera con el de los neandertales. Todas estas porciones de ADN modificadas serían luego reensambladas para formar el ADN completo del neandertal. Entonces esta célula se reprogramaría para que volviera a su estado embrionario[27] y después se implantaría en el útero de una hembra chimpancé.

No obstante, Klein, de la Universidad de Stanford, planteó algunas dudas razonables al formular la siguiente pregunta: «¿Los llevaréis luego a Harvard o a un zoológico?»[28].

Todo este asunto de resucitar una especie extinguida hace mucho tiempo, como la de los neandertales, «planteará, sin duda, problemas éticos», advierte Dawkins[29]. ¿Tendrá derechos el neandertal? ¿Qué sucederá si él o ella desea emparejarse? ¿Quién es responsable si él o ella se lesiona o lesiona a alguien?

Entonces, si se puede resucitar al neandertal, ¿pueden los científicos crear un zoológico para animales extinguidos hace ya mucho tiempo, como el mamut?

¿RESUCITAR AL MAMUT?

La idea no es tan descabellada como parece. Los científicos han logrado ya secuenciar gran parte del genoma del mamut siberiano, ya extinguido. Previamente se habían extraído solo unos pequeños fragmentos de ADN de los mamuts lanudos que se congelaron en Siberia hace decenas de miles de años. Webb Miller y Stephan C. Schuster, de la Universidad del Estado de Pensilvania, consiguieron hacer lo que parecía imposible: extrajeron 3.000 millones de pares de bases de ADN a partir de los esqueletos congelados de los mamuts. Anteriormente, lo más que se había logrado secuenciar del ADN de una especie extinguida era solo 13 millones de pares de bases, menos del 1 por ciento del genoma del animal. (Este avance fue posible gracias a un nuevo aparato de secuenciar llamado equipo de secuenciación de alto rendimiento, que permite escanear miles de genes al mismo tiempo, en vez de hacerlo de uno en uno). Otro truco consistía en saber dónde buscar el ADN antiguo. Miller y Schuster descubrieron que el folículo piloso del mamut lanudo, y no su cuerpo, contenía el mejor ADN.

La idea de resucitar un animal ya extinguido es ahora biológicamente posible. «Hace un año yo habría dicho que eso era ciencia ficción», afirmó Schuster[30]. Pero ahora, con una parte tan grande del genoma del mamut ya secuenciada, la resurrección del animal no está descartada. Incluso hizo un esquema de cómo se podría realizar esto. Schuster calculaba que quizá con solo 400.000 modificaciones en el ADN de un elefante asiático podría crearse un animal que tuviera todas las características esenciales de un mamut lanudo. Sería posible modificar genéticamente el ADN del elefante para acomodar estos cambios, insertar esto en el núcleo de un óvulo de elefante y luego implantar dicho óvulo en una elefante hembra.

El equipo ya está proyectando la secuenciación del ADN de otro animal extinguido. Se trata del tilacino, también llamado lobo marsupial o tigre de Tasmania, que era un marsupial australiano estrechamente emparentado con el diablo de Tasmania y que se extinguió en 1936. Se habla asimismo de secuenciar el pájaro dodo. «Estar más muerto que un dodo» es una expresión coloquial que puede

convertirse en obsoleta si los científicos logran extraer ADN utilizable a partir del tejido blando y los huesos de los esqueletos de dodos que hay en Oxford y en otros lugares.

¿PARQUE JURÁSICO?

Naturalmente, esto nos lleva a la pregunta inicial: ¿Podemos resucitar a los dinosaurios? En una respuesta rápida, quizá no. Un Parque Jurásico depende de que sea posible recuperar intacto el ADN de una forma de vida que se extinguió hace más de 65 millones de años, y esto tal vez sea imposible. Aunque se ha encontrado tejido blando dentro de los fósiles de dinosaurios, concretamente en los huesos de los muslos, hasta ahora no se ha extraído ADN de esta manera, solo proteínas. Si bien estas proteínas han demostrado químicamente la estrecha relación existente entre el *Tyrannosaurus rex*, la rana y el pollo, se está aún muy lejos de poder recuperar el genoma de un dinosaurio.

Sin embargo, Dawkins plantea la posibilidad de comparar genéticamente el genoma de varias especies de aves con los de los reptiles, y luego reconstruir matemáticamente la secuencia del ADN de un «prototipo genérico de dinosaurio». Observa que es posible inducir el crecimiento de raíces de dientes en los picos de los pollos (y de piernas en las serpientes). Por consiguiente, las antiguas características que se han desvanecido hace ya mucho en la noche de los tiempos podrían estar latentes dentro de los genomas.

Esta es la razón por la cual los biólogos se dan cuenta ahora de que los genes pueden activarse y, por consiguiente, también desactivarse. Esto significa que los genes de las antiguas características pueden existir aún, solo que estarían inactivos. Activando esos genes inactivos sería posible recuperar las características antiguas.

Por ejemplo, en un pasado remoto los pollos tenían las patas palmeadas. El gen responsable de esto no desapareció, sino que simplemente se desactivó. Volviendo a activar ese gen, se podría en principio crear pollos que tuvieran las patas palmeadas. De igual modo, los seres humanos estuvieron en otro tiempo cubiertos de pelaje. Sin embargo, lo perdieron cuando empezaron a sudar, lo cual es un modo muy eficiente de regular la temperatura del cuerpo. (Los perros no tienen glándulas sudoríparas, por lo que se refrescan jadeando). El gen del pelaje humano parece existir todavía, pero está desactivado. Por lo tanto, activando ese gen, sería posible conseguir personas que tuvieran pelo por todo el cuerpo. (Algunos han especulado con que esta podría ser la explicación de la leyenda del hombre lobo).

Si suponemos que algunos de los genes de los dinosaurios han estado en realidad desactivados durante millones de años, pero todavía sobreviven en el genoma de los pájaros, sería posible reactivar estos genes que llevan largo tiempo dormidos e

inducir las características de los dinosaurios en los pájaros. Por lo tanto, la propuesta de Dawkins es especulativa, pero no descartable.

CREAR NUEVAS FORMAS DE VIDA

Esto plantea la pregunta final: ¿Podemos crear vida a nuestro antojo? ¿Es posible crear no solo animales extinguidos hace mucho tiempo, sino también animales que nunca han existido? ¿Podríamos crear, por ejemplo, un cerdo con alas o alguno de los animales descritos en la mitología antigua? Incluso a finales de este siglo, los científicos no serán capaces de crear animales a la carta. Sin embargo, la ciencia avanzará un buen trecho hacia la meta de poder modificar el reino animal.

Hasta ahora, lo que nos ha limitado ha sido la capacidad de modificar genes. Solo podemos modificar de manera fiable unos cuantos genes aislados. Por ejemplo, es posible encontrar un gen que haga que algunos animales brillen en la oscuridad. Este gen puede aislarse y luego implantarse en otros animales para conseguir ese efecto de luz. De hecho, actualmente está en marcha una investigación para modificar los animales de compañía mediante la adición de genes concretos.

Pero crear un animal totalmente nuevo, como una quimera de la mitología griega (que es la combinación de tres animales diferentes), requiere la transposición de miles de genes. Para crear un cerdo con alas habría que mover los cientos de genes que representan el ala y asegurarnos de que los músculos y los vasos sanguíneos encajan adecuadamente. Esto queda muy lejos de las posibilidades actuales.

Sin embargo, se han realizado incursiones que podrían facilitar esta posibilidad en el futuro. Los biólogos se asombraron al descubrir que los genes que describen la configuración del cuerpo (desde la cabeza hasta los dedos de los pies) estaban reflejados en el orden en que aparecen en los cromosomas. Se llaman los genes HOX y describen cómo está construido el cuerpo. Al parecer, la naturaleza ha tomado un atajo, reflejando el orden de los órganos del cuerpo con la secuencia encontrada en los propios cromosomas. Esto, a su vez, ha acelerado enormemente el proceso mediante el cual es posible descifrar la historia evolutiva de estos genes.

Además, hay genes maestros que parecen gobernar las propiedades de muchos otros genes. Manipulando unos cuantos genes maestros, pueden manipularse las propiedades de decenas de otros genes.

De manera retrospectiva, vemos que la madre naturaleza ha decidido crear la configuración del cuerpo casi de la misma manera que un arquitecto crea sus proyectos originales. El trazado geométrico del proyecto es del mismo tipo que el trazado real de un edificio. Además, los proyectos son modulares, de tal modo que los bloques de los subproyectos están contenidos en un único proyecto maestro.

Además de crear animales híbridos totalmente nuevos aprovechando el carácter modular del genoma, existe también la posibilidad de aplicar la genética a los seres

humanos, utilizando la biotecnología para recuperar personajes históricos. Según Lanza, siempre que se pueda extraer una célula intacta de una persona fallecida hace tiempo, será posible devolver a esa persona a la vida. En la abadía de Westminster, tenemos cuerpos cuidadosamente conservados de reyes y reinas muertos hace mucho tiempo, así como poetas, personajes religiosos, políticos e incluso científicos, como Isaac Newton. Lanza me comentó que algún día puede que sea posible encontrar ADN intacto dentro de sus cuerpos y devolverlos a la vida.

En la película *Los niños de Brasil*, el argumento gira en torno al proyecto de resucitar a Hitler. Sin embargo, no debemos creer que sea posible recuperar el genio o la notoriedad de ninguna de estas figuras históricas. Como señaló un biólogo, si resucitamos a Hitler, puede que todo lo que consigamos sea un pintor de segunda categoría (que es lo que fue Hitler antes de liderar el movimiento nazi).

¿DESTERRAR TODAS LAS ENFERMEDADES?

La profética película *La vida futura* (1936) estaba basada en una novela de H. G. Wells y predecía el futuro de la civilización después de que una Segunda Guerra Mundial desencadenara un ciclo de sufrimientos y miserias sin fin. Todos los logros de la especie humana han quedado finalmente reducidos a escombros, y hay bandas de señores de la guerra que ejercen su poder sobre un pueblo oprimido y empobrecido. Pero, al final de la película, un grupo de perspicaces científicos, armados con poderosas superarmas, emprenden la tarea de restablecer el orden. Finalmente, la civilización resurge de sus cenizas. En una escena a una niña le cuentan la brutal historia del siglo XX, y la muchacha se entera de que en aquel tiempo existió algo llamado resfriado. ¿Qué es un resfriado?, pregunta la niña. Le dicen que los resfriados eran unas enfermedades que se erradicaron largo tiempo atrás.

Tal vez no.

Curar y erradicar todas las enfermedades ha sido y es uno de los objetivos más antiguos de la humanidad. Sin embargo, incluso en 2100 los científicos no serán capaces de curar todas las enfermedades, ya que estas experimentan mutaciones a una velocidad mayor que la de nuestros intentos por hallar su curación, y además hay demasiadas. A veces olvidamos que vivimos en un océano de bacterias y virus que existen desde miles de millones de años antes de que los seres humanos caminaran por la superficie de la Tierra, y seguirán existiendo miles de millones de años después de que el *Homo sapiens* haya desaparecido.

Muchas enfermedades tienen su origen en los animales. Es uno de los precios que pagamos por su domesticación, que comenzó hace aproximadamente 10.000 años. Por lo tanto, hay una amplia reserva de enfermedades que acechan dentro de unos animales que probablemente sobrevivirán a la especie humana. Normalmente, estas

enfermedades solo infectan a unos cuantos individuos. No obstante, con el surgimiento de las grandes urbes, estas enfermedades contagiosas pudieron propagarse rápidamente entre la población humana, alcanzando una masa crítica y provocando pandemias.

Por ejemplo, cuando unos científicos analizaron la secuencia genética del virus de la gripe, quedaron sorprendidos al descubrir su origen: las aves. Muchas aves pueden ser portadoras de diversas variaciones del virus de la gripe sin padecer efecto alguno. Sin embargo, los cerdos actúan a veces como receptáculos genéticos, después de ingerir excrementos de aves. Además, algunos granjeros suelen vivir cerca de cerdos y aves. Se especula con la posibilidad de que esta sea la razón por la que el virus de la gripe procede a menudo de Asia, porque allí los granjeros practican una ganadería múltiple, es decir, viven en una estrecha proximidad de patos y cerdos al mismo tiempo.

La reciente epidemia de gripe H1N1 es el caso más reciente de mutaciones de gripe aviar y gripe porcina.

Un problema es que los seres humanos están continuamente expandiéndose hacia nuevos entornos, talando bosques, construyendo zonas residenciales y fábricas, mientras van encontrando, durante este proceso, antiguas enfermedades que se ocultan en los animales. Dado que la población humana no deja de expandirse, es de esperar que lleguen más sorpresas procedentes de las zonas forestales.

Por ejemplo, hay una considerable evidencia genética de que el VIH empezó como virus de la inmunodeficiencia de los simios (VIS), que infectaba inicialmente a los monos, pero luego dio el salto a los seres humanos. De manera similar, los hantavirus afectaban a las personas en el sudoeste, cuando estas usurpaban el territorio de los roedores de la pradera. La enfermedad de Lyme, transmitida en gran parte por las garrapatas, ha invadido los suburbios del nordeste porque la gente construye ahora sus casas cerca de los bosques donde habitan estos ácaros. El virus Ébola afectaba probablemente a tribus de seres humanos ya en la antigüedad, pero cuando se ha propagado a poblaciones más amplias y ha dado titulares ha sido con la llegada de los viajes en avión. Incluso la enfermedad del legionario (o legionelosis) es probablemente una enfermedad antigua que se producía en aguas estancadas, pero fue la proliferación de instalaciones de aire acondicionado lo que propagó esta enfermedad a las personas mayores que viajaban en barcos de crucero.

Esto significa que en el futuro habrá muchas sorpresas en cuanto a oleadas de enfermedades exóticas que invadirán los titulares de la prensa.

Desafortunadamente, los tratamientos eficaces para estas enfermedades pueden tardar en llegar.

Por ejemplo, incluso el resfriado común carece actualmente de tratamiento. La plétora de productos que hay en cualquier farmacia trata solo los síntomas, pero no mata al virus. El problema es que existen probablemente más de 300 variedades del

rinovirus que causa el resfriado común, y resulta demasiado caro crear una vacuna para todas ellas.

Con respecto al VIH, la situación es mucho peor, ya que puede haber miles de cepas diferentes. De hecho, el VIH muta con tal rapidez que, aunque pudiéramos crear una vacuna para una de las variedades, el virus no tardaría en mutar de nuevo. Desarrollar una vacuna para el VIH es como intentar hacer blanco en una diana móvil.

Por lo tanto, aunque en el futuro tendremos tratamientos para muchas enfermedades, lo más probable es que haya siempre alguna enfermedad que escape a la ciencia más avanzada.

UN MUNDO FELIZ

En 2100, cuando tengamos el control de nuestro destino genético, tendremos que comparar nuestro destino con la distopía que planteó Aldous Huxley en su profética novela *Un mundo feliz*, cuya acción se sitúa en el año 2540. Cuando se publicó por primera vez en 1932, el libro causó espanto y consternación a todos sus lectores.

Sin embargo, más de setenta y cinco años después, muchas de sus predicciones se han hecho realidad. Huxley escandalizó a la sociedad británica al escribir sobre bebés probeta, diciendo que el placer y la procreación serían cosas separadas, y que las drogas serían de uso común. No obstante, hoy en día vivimos en un mundo en el que la fecundación *in vitro* y la píldora anticonceptiva se consideran algo normal. La única predicción importante que no se ha cumplido es la clonación humana. Huxley previó un mundo jerárquico en el que los médicos clonarían deliberadamente embriones humanos dañados que crecerían para convertirse en servidores de la élite gobernante. Dependiendo del grado de daño mental, estos individuos podían clasificarse en categorías que iban desde los alfas, que eran perfectos y estaban destinados a ser gobernantes, hasta el nivel ínfimo, los épsilon, que eran poco más que esclavos con retraso mental. Así, la tecnología, en vez de liberar a la humanidad de la pobreza, la ignorancia y la enfermedad, se convertiría en una pesadilla, lográndose una estabilidad artificial y corrupta a expensas de esclavizar a toda la población.

Aunque la novela era precisa en muchos aspectos, Huxley no predijo la ingeniería genética. Si hubiera sabido algo sobre esta tecnología, le habría preocupado otro problema: ¿Se dividirá la especie humana en fragmentos, porque unos padres volubles y unos gobiernos tortuosos se entrometerán en los genes de la descendencia? Ya hay padres que visten a sus hijos con ropa extravagante y les hacen participar en competiciones absurdas; entonces, ¿por qué no cambiarles los genes para satisfacer los caprichos de sus progenitores? De hecho, los padres están probablemente

condicionados por la evolución para dar todas las ventajas posibles a su progenie, así que ¿por qué no amañar también los genes?

Como ejemplo elemental de lo que podría salir mal, pensemos en la sencilla ecografía. Aunque los médicos empezaron a aplicarla inocentemente para poder hacer el seguimiento de los embarazos, esta técnica ha llevado a una epidemia masiva de abortos de fetos femeninos, especialmente en las zonas rurales de China y la India. Un estudio realizado en Bombay reveló que 7.997 de cada 8.000 fetos abortados eran hembras. En Corea del Sur el 65 por ciento de todos los bebés nacidos en tercer lugar son varones. La generación de los niños cuyos padres eligieron el aborto a causa del género del feto estarán pronto en edad de contraer matrimonio, y millones de ellos se verán en la imposibilidad de encontrar mujeres, porque no las habrá. A su vez, esto podría causar una enorme dislocación social. Los campesinos que querían solo hijos varones que llevaran su apellido se encontrarán con que no van a tener nietos.

En Estados Unidos hay un creciente mal uso de la hormona del crecimiento humano (HCH), que a menudo se vende como un tratamiento para paliar el envejecimiento. Inicialmente, la HCH se suministraba para corregir deficiencias hormonales en niños que eran demasiado bajos. Pero la HCH se ha convertido en una enorme industria clandestina basada en datos dudosos relativos al envejecimiento. En efecto, internet ha creado una enorme población de cobayas humanos para terapias engañosas.

Así pues, dada la ocasión, la gente a menudo hará un mal uso de la tecnología y causará enormes perjuicios. ¿Qué pasaría si pudieran disponer de la ingeniería genética?

En el peor de los casos, llegaríamos a vivir la pesadilla imaginada por H. G. Wells en su clásica novela de ciencia ficción *La máquina del tiempo*, donde la especie humana, en el año 802701 d. C. se divide en dos especies diferentes. Wells escribió: «Poco a poco empecé a ser consciente de la verdad. El Hombre no seguía siendo una especie, sino que había dado lugar a dos animales diferentes: mis agraciados niños del Mundo Superior no eran los únicos descendientes de nuestra generación, sino que esta Cosa descolorida, obscena y nocturna que había surgido ante mí era también heredera legítima para siempre».

Para ver qué variaciones de la especie humana son posibles, basta con mirar el perro doméstico. Aunque hay miles de razas caninas, todas descienden en origen del *Canis lupus*, el lobo gris, que fue domesticado hace aproximadamente 10.000 años, al final del último período glacial. A través de la cría selectiva llevada a cabo por sus amos humanos, actualmente los perros existen en una desconcertante variedad de tamaños y formas. La forma del cuerpo, el temperamento, el color y las habilidades de estos animales se han modificado radicalmente mediante la cría selectiva.

Dado que los perros son más o menos siete veces más rápidos que los seres humanos, podemos calcular que han existido unas 1.000 generaciones de perros desde que se diferenciaron de los lobos. Si aplicamos esto a los seres humanos,

entonces la cría sistemática de humanos podría dividir la especie humana en miles de razas en solo 70.000 años, aunque seguirían perteneciendo a la misma especie. Con la ingeniería genética, se puede pensar que este proceso podría acelerarse enormemente: se realizaría en una sola generación.

Afortunadamente, hay razones para creer que la especiación de la población humana no se producirá, al menos no durante el próximo siglo. En la evolución, una única especie suele dividirse si se separa geográficamente en dos poblaciones que se reproducen separadamente. Esto sucedió, por ejemplo, en Australia, donde la separación física de muchas especies animales ha dado como resultado la evolución de animales que no se encuentran en ningún otro lugar de la Tierra, tales como los marsupiales, entre los que cabe citar el canguro. Por el contrario, las poblaciones humanas tienen una gran movilidad, sin cuellos de botella evolucionarios, y están muy entremezcladas.

Como dijo Gregory Stock, de la UCLA: «Actualmente, la evolución darwiniana tradicional casi no produce cambio alguno en los humanos, y es muy poco probable que lo vaya a hacer en un futuro inmediato. La población humana es demasiado grande y está demasiado enmarañada, aparte de que las presiones selectivas están demasiado localizadas y son transitorias[31]».

También hay limitaciones que proceden del Principio del Hombre de las Cavernas.

Como se ha mencionado anteriormente, a menudo la gente rechaza los avances tecnológicos (por ejemplo, la oficina sin papel), cuando la tecnología contradice la naturaleza humana, que se ha mantenido relativamente constante durante los últimos 100.000 años. La gente no desea crear hijos de diseño que se desvíen de la norma y estén considerados como unos monstruos por sus semejantes. Esto reduciría sus posibilidades de tener éxito dentro de la sociedad. Vestir a los hijos con ropas extravagantes es una cosa, pero cambiar de manera permanente su herencia es algo totalmente diferente. (En un mercado libre, habrá probablemente un nicho para genes raros, pero será pequeño, ya que el mercado responderá a la demanda del consumidor). Es más que probable que hacia finales de siglo se le ofrezca a una pareja toda una gama de genes para que elija, y serán sobre todo los que sirvan para eliminar enfermedades genéticas, pero también habrá algunos destinados a conseguir mejoras genéticas. Sin embargo, habrá poca presión de mercado para financiar el estudio de genes raros, porque la demanda de estos será muy pequeña.

El peligro real vendrá no tanto de la escasa demanda de los consumidores, sino de los gobiernos dictatoriales, que pueden querer usar la ingeniería genética para sus propios fines, tales como crear soldados más fuertes pero más obedientes.

Otro problema surgirá en un futuro lejano si tenemos colonias espaciales en otros planetas en los que la gravedad y las condiciones climáticas sean muy diferentes de las de la Tierra. Siendo realistas, podríamos pensar que en ese momento, quizá en el próximo siglo, se creará mediante la ingeniería genética una nueva raza de humanos

que puedan adaptarse a campos gravitatorios y condiciones atmosféricas diferentes. Por ejemplo, esa nueva raza de humanos puede ser capaz de consumir distintas cantidades de oxígeno, adaptarse a otra duración del día y tener un peso corporal y un metabolismo diferentes. Pero los viajes espaciales serán caros durante mucho tiempo. A finales de siglo, podremos tener un pequeño destacamento en Marte, pero la inmensa mayoría de la especie humana seguirá viviendo en la Tierra. Durante décadas, incluso siglos, en el futuro los viajes espaciales serán para los astronautas, los ricos y, tal vez, un reducido grupo de audaces colonizadores del espacio.

Por lo tanto, la división de la especie humana en diferentes especies que naveguen por el espacio, por todo el sistema solar y más allá no sucederá durante este siglo, y quizá tampoco en el siguiente. En un futuro previsible, a menos que se produzcan espectaculares avances en tecnología espacial, estaremos en gran medida anclados en la Tierra.

Por último, hay otra amenaza que nos acecha antes de que lleguemos a 2100: la posibilidad de que alguien haga deliberadamente que esta tecnología se vuelva contra nosotros en forma de guerra bacteriológica de diseño.

LA GUERRA BACTERIOLÓGICA

La guerra bacteriológica es tan antigua como la Biblia. Los guerreros de la antigüedad solían lanzar cuerpos enfermos sobre las murallas del enemigo o envenenar sus pozos arrojando en ellos animales enfermos. Otro modo de destruir al enemigo era darle deliberadamente ropa infectada con la viruela. Pero con las tecnologías modernas los gérmenes pueden cultivarse genéticamente para barrer del mapa a millones de personas.

En 1972, Estados Unidos y la antigua Unión Soviética firmaron un histórico tratado que prohibía el uso de la guerra biológica con fines ofensivos. Sin embargo, la ingeniería genética tiene hoy en día una tecnología tan avanzada que ese tratado carece ya de sentido.

En primer lugar, cuando se trata de investigación con ADN, no hay tecnologías ofensivas ni defensivas. La manipulación de los genes puede utilizarse para cualquiera de estos fines.

En segundo lugar, con la ingeniería genética es posible crear bacterias adaptadas para ser armas, es decir, modificadas deliberadamente para potenciar su carácter letal o su capacidad para propagarse por el entorno. En otro tiempo se creyó que solo Estados Unidos y Rusia poseían los últimos viales que contenían el virus de la viruela, el agente más mortífero de la historia de la especie humana. En 1992, un desertor soviético afirmó que los rusos habían modificado el virus de la viruela para convertirlo en un arma y habían producido hasta veinte toneladas del virus. Tras el

hundimiento de la Unión Soviética, hay un temor constante a que algún día un grupo terrorista pague para tener acceso al arma de la viruela.

En 2005, unos biólogos lograron resucitar el virus de la gripe española de 1918, que se había cobrado más vidas que la Primera Guerra Mundial. Lo curioso es que pudieron resucitar el virus analizando a una mujer que había muerto de esta gripe y estaba enterrada en el permafrost de Alaska, así como utilizando muestras tomadas por militares estadounidenses durante la epidemia.

Tras el análisis, los científicos procedieron a publicar en la web el genoma completo de este virus, dándolo a conocer al mundo entero. Muchos científicos se sintieron incómodos con respecto a esto, porque se dieron cuenta de que, algún día, incluso un estudiante con acceso a un laboratorio universitario podría resucitar a uno de los mayores asesinos de la historia de la humanidad.

A corto plazo, la publicación del genoma del virus de la gripe española fue una mina para los científicos, que pudieron examinar aquellos genes para resolver una incógnita que llevaba mucho tiempo planteada: ¿Qué sucedió para que una pequeñísima mutación pudiera causar un daño tan enorme y extendido a la población humana? Pronto encontraron la respuesta. El virus de la gripe española, a diferencia de otras variedades, hace que el sistema inmunológico humano reaccione exageradamente, liberando grandes cantidades de fluidos que acaban por matar al enfermo. La persona literalmente se ahoga en sus propios fluidos. Una vez que se entendió esto, los genes que causaban este efecto mortal pudieron ser comparados con los de la gripe H1N1 y con los de otros virus. Afortunadamente, ninguno de ellos poseía este gen letal. Además, realmente se podía calcular en qué medida un virus estaba cerca de alcanzar esa alarmante virulencia, y el de la gripe H1N1 quedaba muy lejos de conseguirla.

Sin embargo, a largo plazo hay que pagar un precio. Cada año que pasa, resulta más y más fácil manipular los genes de los organismos vivos. Los costes están cayendo en picado, y la información está ampliamente disponible en internet.

Algunos científicos creen que dentro de unas pocas décadas será posible construir un aparato que nos permita crear cualquier gen con solo teclear los componentes deseados. Tecleando los símbolos ATCG que componen un gen, el aparato cortará y empalmará automáticamente el ADN para construir ese gen. Si se cumple el pronóstico, eso significa que algún día hasta los estudiantes de bachillerato podrán quizá realizar manipulaciones avanzadas con las formas de vida.

Una situación de pesadilla es el sida aerotransportado. Por ejemplo, los virus del resfriado poseen unos pocos genes que les permiten sobrevivir en las gotitas de los aerosoles, de tal modo que un estornudo puede infectar a otras personas. Actualmente, el virus del sida es bastante vulnerable cuando está expuesto a factores medioambientales. Pero, si los genes del virus del resfriado se implantaran en el virus del sida, cabe pensar que este podría ser capaz de sobrevivir fuera del cuerpo humano. Esto podría hacer que el virus del sida se propagara como el resfriado

común, con lo que infectaría a una gran parte de la especie humana. También se sabe que los virus y las bacterias no intercambian sus genes, por lo que existe asimismo la posibilidad de que los virus del sida y del resfriado común intercambien genes de forma natural, aunque esto es menos probable.

En el futuro un grupo terrorista o un Estado nacional podrían utilizar el sida modificando el virus para convertirlo en un arma letal. Lo único que les impediría liberar virus del sida y dispersarlos en el medio ambiente sería el hecho de que ellos también perecerían.

Esta amenaza se convirtió en algo real justo después de la tragedia del 11-S. Una persona desconocida envió por correo paquetes en los que había un polvo blanco que contenía esporas de ántrax. Los destinatarios de estos envíos fueron políticos bien conocidos en todo el país. Un análisis microscópico detallado de aquel polvo blanco puso de manifiesto que las esporas de ántrax habían sido modificadas para convertirlas en armas de destrucción letales. De repente, todo el país fue presa del pánico de que un grupo terrorista tuviera acceso a armas biológicas avanzadas. Aunque el ántrax se encuentra en la tierra y en todo nuestro entorno, solo una persona con formación científica avanzada e intenciones propias de un maníaco podría haberlo purificado y adaptado al uso armamentístico para llevar a cabo tan disparatada y criminal hazaña.

Hasta hoy, ni siquiera después de la mayor caza al hombre desencadenada en Estados Unidos, ha podido encontrarse al culpable (aunque recientemente se ha suicidado uno de los principales sospechosos). La cuestión es que un individuo solo, con algo de formación tecnológica avanzada, puede aterrorizar a toda una nación.

Un factor restrictivo que ha mantenido la guerra bacteriológica en suspenso es el interés propio. Durante la Primera Guerra Mundial, la eficacia del gas venenoso en el campo de batalla fue muy desigual. Las condiciones del viento eran a menudo impredecibles, por lo que el gas podía volver hacia las tropas que lo habían liberado. Su eficacia militar consistía en gran medida en aterrorizar al enemigo más que en derrotarlo. No hubo una sola batalla decisiva que se ganara utilizando gas venenoso. E incluso en los tiempos de la guerra fría ambos bandos sabían que los gases venenosos y las armas biológicas podían tener efectos impredecibles en el campo de batalla y provocar fácilmente una escalada de violencia que desembocara en la confrontación nuclear.

Como hemos visto, los argumentos enunciados en este capítulo hacen referencia a la manipulación de genes, proteínas y moléculas. Ahora surge de forma natural la siguiente pregunta: ¿Hasta qué punto podemos manipular los átomos?

4

NANOTECNOLOGÍA

¿Todo a partir de nada?



Los principios de la física, hasta donde yo sé, no dicen nada en contra de manipular las cosas átomo por átomo.

RICHARD FEYNMAN, PREMIO NOBEL

La nanotecnología nos ha dado las herramientas precisas para jugar con el cajón de los juguetes fundamentales y últimos de la naturaleza: los átomos y las moléculas. Todo está hecho con átomos y moléculas, y las posibilidades de crear cosas nuevas son ilimitadas.

HORST STORMER, PREMIO NOBEL

El papel que desempeña lo infinitamente pequeño es infinitamente grande.

LOUIS PASTEUR

EL MANEJO DE HERRAMIENTAS es el logro supremo que distingue a la humanidad de los animales. Según las mitologías griega y romana, este proceso comenzó cuando Prometeo, apiadándose de la difícil situación de los mortales, robó de la forja de Vulcano el precioso don del fuego. Pero este robo enfureció a los dioses. Para castigar a la humanidad, Zeus discurrió un ingenioso truco. Pidió a Vulcano que forjara una caja y una hermosa mujer de metal. Vulcano creó esta estatua, llamada Pandora, y luego utilizó sus poderes mágicos para darle vida. A continuación, le dijo que nunca abriera la caja, pero, un día, Pandora, llevada por la curiosidad, lo hizo y, con aquel acto, liberó todos los vientos del caos, la miseria y el sufrimiento en el mundo, dejando en la caja solo la esperanza.

Por consiguiente, es de la fragua divina de Vulcano de donde surgieron tanto los sueños como el sufrimiento de la especie humana. Hoy en día estamos diseñando nuevas máquinas revolucionarias que son las herramientas últimas, forjadas a partir de los átomos tomados de uno en uno. Pero ¿liberarán estas máquinas el fuego de la luz y el conocimiento, o los vientos del caos?

A lo largo de la historia de la humanidad, la maestría en el desarrollo y uso de herramientas ha determinado nuestro destino. Cuando se perfeccionaron el arco y la flecha, hace miles de años, esto supuso que pudiéramos lanzar proyectiles mucho más lejos que haciéndolo solo con la mano, aumentando así nuestra eficiencia como cazadores y, por consiguiente, nuestra provisión de alimentos. Cuando se inventó la metalurgia, hace unos 7.000 años, pudimos abandonar las cabañas de barro y paja y crear grandes edificios que se elevaban en el paisaje. Desde la selva y el desierto pronto comenzaron a surgir imperios, construidos con las herramientas forjadas a partir de los metales.

Y ahora estamos a punto de conseguir un nuevo tipo de herramienta mucho más poderosa que cualquier otra que hayamos conocido con anterioridad. Esta vez podremos manejar los propios átomos, a partir de los cuales se ha creado todo. Durante este siglo llegaremos a poseer la herramienta más importante que se pueda imaginar, la nanotecnología, que nos permitirá manipular los átomos de uno en uno. Esto podría iniciar una segunda revolución industrial, ya que la fabricación molecular crea nuevos materiales con los que hasta ahora ni siquiera soñábamos, unos materiales extraordinariamente fuertes, ligeros y con unas propiedades eléctricas y magnéticas asombrosas.

El premio Nobel Richard Smalley ha dicho: «El grandioso sueño de la nanotecnología es poder construir con los átomos como si estos fueran ladrillos[1]». Philip Kuekes, de Hewlett-Packard, ha dicho: «En definitiva, el objetivo no se reduce solo a hacer ordenadores del tamaño de partículas de polvo. La idea sería hacer ordenadores sencillos del tamaño de las bacterias. De este modo, podríamos tener dentro de una partícula de polvo algo tan poderoso como lo que tenemos ahora encima de la mesa[2]».

No se trata de las esperanzas de unos visionarios alucinados. El gobierno de Estados Unidos se lo toma muy en serio. En 2009, a causa del inmenso potencial de la nanotecnología para aplicaciones médicas, industriales, aeronáuticas y comerciales, la Iniciativa Nacional en Nanotecnología asignó 1.500 millones de dólares para investigación. El Informe sobre Nanotecnología de la Fundación Nacional de la Ciencia, emitido por el gobierno, afirma: «La nanotecnología tiene el potencial de mejorar el rendimiento humano, aportar un desarrollo sostenible en relación con materiales, agua, energía y alimentos, proteger contra bacterias y virus desconocidos…»[3].

En última instancia, la economía mundial y el destino de las naciones puede depender de esto. Hacia 2020, o poco más tarde, la ley de Moore empezará a fallar y quizá acabe por desplomarse. La economía mundial puede acabar sumida en el caos, a menos que los físicos encuentren un sustituto adecuado de los transistores de silicio para accionar los ordenadores. La solución de este problema puede llegar a través de la nanotecnología.

Quizá a finales de este siglo, la nanotecnología podría también crear una máquina para una cosa que solo los dioses pueden hacer: crear algo a partir de prácticamente la nada.

EL MUNDO CUÁNTICO

El primero que llamó la atención sobre este nuevo dominio de la física fue el premio Nobel Richard Feynman, que planteó una pregunta decepcionantemente simple: ¿Cómo de pequeña podemos hacer una máquina? No se trataba de una pregunta retórica. Los ordenadores se iban haciendo cada vez más pequeños, con lo cual el aspecto de la industria estaba cambiando, y resultaba evidente que la respuesta a aquella pregunta podía tener un enorme impacto en la sociedad y la economía.

En una conferencia profética pronunciada en 1959 ante la Sociedad Norteamericana de Física con el título «There's Plenty of Room at the Bottom», Feynman dijo: «Es interesante la idea de que, en principio, un físico tendría la posibilidad (según creo yo) de sintetizar cualquier sustancia química que un químico prescribiera. Haga usted el encargo y el físico lo sintetiza. ¿Cómo? Es cuestión de colocar los átomos donde diga el químico, y así se hace la sustancia demandada». Feynman llegó a la conclusión de que era posible fabricar máquinas a partir de átomos tomados de uno en uno, pero las nuevas leyes de la física harían difícil la creación de dichas máquinas, aunque no imposible.

En definitiva, la economía mundial y el destino de las naciones pueden depender de los extraños y nada intuitivos principios de la teoría cuántica. Normalmente pensamos que las leyes de la física permanecen invariables aunque descendamos a escalas cada vez menores. Pero esto no es verdad. En algunas películas como *Cariño, he encogido a los niños*, de Disney, y *El increíble hombre menguante* se nos transmite la idea errónea de que las personas en miniatura estarían sometidas a las leyes de la física del mismo modo que lo estamos nosotros. Por ejemplo, en una escena de la película de Disney, los encogidos protagonistas cabalgan sobre una hormiga mientras cae un aguacero. Las gotas de lluvia caen al suelo formando unos charcos diminutos, igual que en nuestro mundo. Pero, en la realidad, las gotas de lluvia pueden ser más grandes que las hormigas. Por consiguiente, cuando una hormiga se encuentra frente a una gota de lluvia, verá un enorme hemisferio de agua. Ese hemisferio de agua no se desparrama porque la tensión superficial de los líquidos actúa a la manera de una red que mantiene la gota como un todo unido. En nuestro mundo la tensión superficial del agua es bastante pequeña, por lo que ni siquiera la percibimos. Pero a escala de una hormiga, la tensión superficial es proporcionalmente enorme, de modo que la lluvia cae recogiéndose en forma de gotas.

(Además, si intentáramos agrandar la hormiga a escala, de modo que tuviera el tamaño de una casa, tendríamos otro problema: se le romperían las patas. A medida

que agrandamos el cuerpo de la hormiga, su peso crece mucho más rápido que la fuerza de sus patas. Si multiplicamos por 10 las dimensiones de una hormiga, su volumen, y por lo tanto su peso, aumenta 10 × 10 × 10 = 1.000 veces. Pero su fuerza depende del espesor de sus músculos, que son solo 10 × 10 = 100 veces más fuertes. Por lo tanto, la hormiga gigante es 10 veces más débil que una hormiga normal. Esto significa también que King Kong, en vez de aterrorizar a Nueva York, se derrumbaría si intentara escalar el Empire State Building).

Feynman señaló que también hay otras fuerzas que actúan a escala del átomo, tales como el enlace por puente de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals, generadas por las diminutas fuerzas eléctricas que existen entre los átomos y las moléculas. Muchas de las propiedades físicas de las sustancias están determinadas por estas fuerzas.

(Para visualizar esto, pensemos en la razón por la que las autopistas del Nordeste tienen tantos baches. Cada invierno el agua se filtra en las diminutas fisuras del asfalto; el agua se expande al congelarse, haciendo que el asfalto se parta y aparezca un bache. Sin embargo, va en contra del sentido común pensar que el agua se expande al helarse. Pero se expande a causa del enlace de hidrógeno. La molécula de agua tiene una pequeña carga negativa en su parte inferior y una carga positiva en la parte superior. Por lo tanto, cuando el agua se congela, y sus moléculas se apilan, estas se expanden, formando una retícula regular de hielo con muchos espacios entre las moléculas. Las moléculas de agua se colocan formando hexágonos. Así pues, el agua se expande al helarse porque en un hexágono hay más espacio entre los átomos. Esta es también la razón por la cual los copos de nieve tienen seis lados, y explica por qué el hielo flota sobre el agua, cuando por derecho propio tendría que hundirse).

CAMINAR ATRAVESANDO LAS PAREDES

Además de la tensión superficial, el enlace de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals, existen también unos curiosos efectos cuánticos a escala del átomo. Normalmente, en nuestra vida cotidiana no vemos cómo funcionan las fuerzas cuánticas. Pero estas fuerzas están por todas partes. Por ejemplo, dado que los átomos en gran medida están vacíos, en justicia tendríamos que poder caminar atravesando las paredes. Entre el núcleo, que ocupa el centro del átomo, y las capas de electrones no hay más que un vacío. Si el átomo tuviera el tamaño de un estadio de fútbol, el estadio estaría vacío, ya que el núcleo tendría apenas el tamaño de un grano de arena.

(A veces sorprendemos a los alumnos con una sencilla demostración. Tomamos un contador Geiger, lo colocamos frente a un estudiante y a este le ponemos una inofensiva bolita radiactiva en la espalda. El estudiante se asusta porque algunas partículas le atraviesan y ponen en funcionamiento el contador Geiger, como si su cuerpo estuviera en gran medida vacío, lo cual es cierto).

Pero, si estamos en gran medida vacíos, ¿por qué no podemos atravesar las paredes? En la película *Ghost: más allá del amor* el personaje de Patrick Swayze es asesinado por un rival y se convierte en fantasma. Se lleva una decepción cada vez que intenta tocar a la que ha sido su novia, interpretada por Demi Moore. Sus manos pasan a través de la materia; descubre que carece de sustancia material y simplemente flota a través de los objetos sólidos. En una escena mete la cabeza en un vagón de metro en movimiento. El tren acelera con la cabeza de Patrick dentro, pero él no siente absolutamente nada. (La película no explica por qué la gravedad no le arrastra a través del suelo hasta hacerle caer en el centro de la Tierra. Los fantasmas, aparentemente, pueden atravesar cualquier cosa, excepto los suelos).

¿Por qué no podemos atravesar los objetos sólidos, como hacen los fantasmas? La respuesta está en un curioso fenómeno cuántico. El principio de exclusión de Pauli afirma que no existen dos electrones que se encuentren en el mismo estado cuántico. Por consiguiente, cuando dos electrones casi idénticos se acercan demasiado el uno al otro, se produce una repulsión mutua. Esta es la razón por la que los objetos parecen sólidos, aunque se trata de una ilusión. La realidad es que la materia está básicamente vacía.

Cuando estamos sentados en una silla, creemos que la tocamos, pero en realidad estamos suspendidos sobre ella, flotando a menos de un nanometro sobre el asiento, porque las fuerzas eléctricas y cuánticas de la silla nos repelen. Esto significa que, siempre que «tocamos» algo, no estamos en contacto directo con ello, sino separados por esas leves fuerzas atómicas. (Lo cual significa también que, si supiéramos neutralizar de algún modo el principio de exclusión, seríamos capaces de atravesar los muros. El problema es que nadie sabe cómo hacerlo).

La teoría cuántica no solo impide que los átomos choquen y se atraviesen los unos a los otros, sino que también los une para que formen moléculas. Imaginemos por un momento que un átomo es como un diminuto sistema solar, con los planetas girando en torno a un sol. Entonces, si dos de estos sistemas solares chocaran, los planetas también chocarían unos con otros o saldrían volando en todas direcciones, haciendo que el sistema solar se destruyera. Los sistemas solares nunca son estables cuando chocan con otro sistema solar, por lo que, en buena lógica, los átomos se destruirían al chocar uno con otro.

En realidad, cuando dos átomos se aproximan demasiado el uno al otro, o bien salen disparados porque se repelen mutuamente, o se combinan para formar una molécula estable. La razón por la que los átomos tienen la posibilidad de formar moléculas estables es que dos átomos pueden compartir electrones. Normalmente, la idea de que dos átomos puedan compartir un electrón suena absurda. Es imposible si el electrón obedece las leyes de Newton, que concuerdan con lo que dicta el sentido común. Sin embargo, a causa del principio de incertidumbre de Heisenberg, nunca sabemos con exactitud dónde se encuentra el electrón. Lo que sucede es que anda apretujado entre dos átomos y los mantiene unidos.

En otras palabras, si desconectáramos la teoría cuántica, nuestras moléculas se desharían al chocar unas con otras, y nos disolveríamos en un gas de partículas. Así pues, la teoría cuántica explica por qué los átomos pueden unirse para formar la materia sólida en vez de desintegrarse.

(Esta es también la razón por la que no puede haber mundos dentro de otros mundos. Algunos se imaginan que nuestro sistema solar o nuestra galaxia podrían ser un átomo en el universo gigantesco de algún otro. De hecho, esta era la escena final de la película *Hombres de negro*, donde todo el universo conocido era solo un átomo en el juego de pelota de unos extraterrestres. Sin embargo, según las leyes de la física, esto es imposible, ya que dichas leyes cambian cuando se pasa de una escala a otra. Las reglas que gobiernan los átomos son muy diferentes de las que gobiernan las galaxias).

Algunos de los alucinantes principios de la teoría cuántica son:

- es imposible conocer la velocidad y la ubicación exactas de cualquier partícula: siempre hay incertidumbre;
- en cierto sentido, una partícula puede estar en dos lugares a la vez;
- todas las partículas existen como mezclas de diferentes estados simultáneamente; por ejemplo, las partículas que giran pueden ser mezclas de partículas cuyos ejes determinan al mismo tiempo dos estados: espín hacia arriba y espín hacia abajo;
- podemos desaparecer y luego reaparecer en algún otro lugar.

Todas estas afirmaciones suenan absurdas. De hecho, Einstein dijo en una ocasión: «Cuanto más acertada es la teoría cuántica, más absurda parece». Nadie sabe de dónde vienen esas leyes extrañas. Son meros postulados sin explicación alguna. La teoría cuántica tiene una sola cosa a su favor: es correcta. Su precisión se ha medido hasta una diezmilmillonésima, lo que la convierte en la teoría física más acertada de todos los tiempos.

La razón por la que no vemos estos increíbles fenómenos en la vida cotidiana es que estamos formados por billones de billones de átomos, y el efecto que estos producen es, en cierto modo, una media de los que producen todos y cada uno de ellos.

ÁTOMOS EN MOVIMIENTO

Richard Feynman soñaba con el día en que un físico pudiera fabricar cualquier molécula átomo a átomo. En 1959 eso parecía imposible, pero parte de aquel sueño es ahora realidad.

Tuve ocasión de ver todo esto de cerca cuando visité el Centro de Investigación Almaden de IBM en San José, California. Fui allí para observar un instrumento extraordinario, el microscopio de efecto túnel, que permite a los científicos ver y manipular los átomos de uno en uno. Este aparato fue inventado por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, de IBM, que obtuvieron por dicho invento el premio Nobel en 1986. (Recuerdo que, cuando era niño, el profesor nos decía que nunca podríamos ver átomos. Decía que eran demasiado pequeños. Para entonces yo ya había decidido ser científico atómico. Me daba cuenta de que pasaría el resto de mi vida estudiando algo que nunca podría observar directamente. Sin embargo, hoy en día no solo podemos ver átomos, sino que podemos jugar con ellos, usando pinzas atómicas).

El microscopio de efecto túnel no es realmente un microscopio, en absoluto. Se parece a un antiguo fonógrafo. Una fina aguja (cuya punta es del tamaño de un átomo) pasa lentamente sobre el material que se está analizando. Una suave corriente eléctrica viaja desde la aguja, a través del material, hasta la base del instrumento. Cuando la aguja pasa sobre el objeto, la corriente eléctrica cambia ligeramente cada vez que pasa por un átomo. Después de múltiples pasadas, el aparato imprime el sorprendente bosquejo del propio átomo. Utilizando una aguja idéntica, el microscopio no solo es capaz de registrar los átomos, sino también de moverlos. De este modo, pueden formarse letras, como las iniciales IBM, e incluso diseñar, de hecho, aparatos primitivos fabricados con átomos.

(Otro invento reciente es el microscopio de fuerza atómica, que puede darnos unas alucinantes imágenes tridimensionales de conjuntos de átomos. Este microscopio también utiliza una aguja con una punta muy fina, pero proyecta un rayo láser sobre ella. Al pasar sobre el material que se está estudiando, la aguja oscila, y este movimiento es registrado por la imagen de rayo láser).

Me pareció que mover de aquí para allá los átomos individualmente resultaba bastante sencillo. Yo estaba sentado frente a una pantalla de ordenador, mirando una serie de esferas blancas, cada una de las cuales se parecía a una pelota de ping-pong de unos dos centímetros y medio de diámetro. En realidad, cada bola era un átomo. Coloqué el cursor sobre uno de aquellos átomos y luego lo moví a otra posición. Pulsé la tecla que activaba la aguja para que esta moviera el átomo. El microscopio volvió a escanear la sustancia en cuestión. La pantalla cambió, mostrando que la bola se había movido exactamente al lugar donde yo deseaba que estuviese.

El proceso completo de mover cada átomo a la posición deseada tardaba solo un minuto. De hecho, en unos treinta minutos descubrí que podía formar algunas letras que aparecían en la pantalla y que estaban hechas de átomos individuales. Al cabo de una hora logré hacer dibujos bastante complejos en los que intervenían unos diez átomos.

Me costó recuperarme de la impresión que me produjo la experiencia de mover átomos realmente, algo que en otro tiempo se había considerado imposible.

MEMS Y NANOPARTÍCULAS

Aunque la nanotecnología vive todavía su infancia, ha generado ya una industria en expansión dedicada a recubrimientos químicos. Rociando finas capas de productos químicos de solo unas pocas moléculas de espesor sobre un producto comercial es posible hacerlo más resistente a la oxidación o cambiar sus propiedades ópticas. Actualmente otras aplicaciones comerciales son ropas resistentes a las manchas, pantallas de ordenador mejoradas, herramientas más fuertes para el corte de metales y recubrimientos resistentes al rayado. Durante los próximos años se comercializarán cada vez más productos dotados de microrrecubrimientos que mejoren su rendimiento.

En su mayor parte, la nanotecnología es aún una ciencia muy joven. Pero hay un aspecto de esta ciencia que está empezando ahora a afectar a las vidas de todos nosotros y ya ha creado una lucrativa industria que factura 40.000 millones de dólares en todo el mundo: la industria de los sistemas microelectromecánicos (MEMS: *microelectromechanical systems*). En esta industria están incluidos todo tipo de productos, desde cartuchos de inyección de tinta, sensores de airbag y pantallas luminosas, hasta giroscopios para coches y aviones. Los MEMS son aparatos diminutos, tan pequeños que pueden encajar fácilmente en la punta de una aguja. Se fabrican usando la misma tecnología de grabado que se utiliza en la fabricación de ordenadores. En vez de grabar transistores, los ingenieros graban unos diminutos componentes mecánicos, creando así unas piezas de maquinaria tan pequeñas que se necesita un microscopio para poder verlas.

Los científicos han realizado una versión atómica del ábaco, la venerable herramienta de cálculo asiática que se compone de varias columnas verticales de alambres en los que van ensartadas cuentas de madera. En 2000, unos científicos del Laboratorio IBM en Zurich hicieron una versión atómica del ábaco manipulando átomos con un microscopio de efecto túnel. En vez de cuentas de madera que suben y bajan por los alambres verticales, el ábaco atómico usaba *buckyballs*[*], que son átomos de carbono organizados para constituir una molécula cuya forma es como la de un balón de fútbol y cuyo tamaño es 5.000 veces menor que el diámetro de un pelo humano.

En Cornell los científicos han llegado a crear una guitarra atómica. Tiene seis cuerdas, y cada cuerda está formada por 100 átomos. Colocándolas una tras otra, veinte de estas guitarras cabrían en un pelo humano. La guitarra es real, con cuerdas reales que pueden puntearse (aunque la frecuencia de esta guitarra atómica es demasiado alta para que pueda oírla un oído humano).

Pero la aplicación práctica más extendida de esta tecnología se encuentra en los airbags, que contienen diminutos acelerómetros MEM capaces de detectar un frenado repentino del coche. El acelerómetro MEM está formado por una bola microscópica unida a un muelle o palanca. Cuando damos un frenazo, la deceleración repentina

produce una sacudida en la bola, cuyo movimiento genera una diminuta carga eléctrica. Esta carga desencadena entonces una explosión química que libera grandes cantidades de gas nitrógeno en 1/25 de segundo. Esta tecnología ha salvado ya miles de vidas.

EL FUTURO CERCANO
(DESDE EL PRESENTE HASTA 2030)

NANOMÁQUINAS EN NUESTROS CUERPOS

En un futuro cercano es de esperar que surja una nueva variedad de nanodispositivos que pueden revolucionar la medicina, tales como nanoaparatos que hagan un recorrido a través del flujo sanguíneo. En la película *El viaje fantástico*, una tripulación de científicos y el barco en que viajan quedan miniaturizados hasta alcanzar el tamaño de un glóbulo rojo. Entonces se embarcan en un viaje por el flujo sanguíneo y el cerebro de un paciente, descubriendo así una serie de angustiosos peligros dentro de su cuerpo. Uno de los objetivos de la nanotecnología es crear cazadores moleculares que acudan velozmente a las células cancerosas y las destruyan limpiamente, dejando las células normales intactas. Los escritores de ciencia ficción han soñado desde hace mucho tiempo con un aparato molecular de búsqueda y destrucción que flote por la sangre, buscando constantemente células cancerosas. Sin embargo, en otro tiempo las mentes críticas consideraban que esto era imposible, un sueño con el que entretenían su ocio los escritores de ficción.

Parte de ese sueño se está haciendo realidad hoy en día. En 1992, Jerome Schentag, de la Universidad de Buffalo, inventó la píldora inteligente, que ya se ha mencionado con anterioridad, y que es un diminuto instrumento del tamaño de una píldora, que tragamos y al que se puede hacer un seguimiento electrónicamente. Entonces se le dan instrucciones para que suministre medicamentos en el lugar adecuado. Se han fabricado píldoras inteligentes que contienen cámaras de televisión para fotografiar el interior del cuerpo a medida que bajan por el estómago y el intestino. Se pueden utilizar imanes para guiar a estas píldoras. De esta manera, el dispositivo en cuestión puede buscar tumores y pólipos. En el futuro será posible realizar operaciones de cirugía menor mediante estas píldoras, extirpando cualquier cosa anormal y haciendo biopsias desde el interior, sin necesidad de seccionar la piel.

Un dispositivo de tamaño mucho menor es la nanopartícula, una molécula que puede liberar medicamentos contra el cáncer en un objetivo específico y que revolucionaría los tratamientos oncológicos. Estas nanopartículas pueden compararse con una bomba molecular inteligente, diseñada para incidir en un objetivo específico con una carga química, reduciendo así considerablemente los efectos secundarios del

proceso. Mientras que una bomba tonta incide en todo, incluidas las células sanas, las bombas inteligentes son selectivas y se dirigen con precisión a las células cancerosas.

Cualquiera que haya experimentado los horribles efectos secundarios de la quimioterapia comprenderá el enorme potencial que tienen estas nanopartículas para reducir el sufrimiento humano. La quimioterapia actúa bañando todo el cuerpo con toxinas mortales, con una eficiencia para matar células cancerosas ligeramente superior a la que tiene para matar células normales. El daño colateral que produce la quimioterapia es general. Los efectos secundarios (náuseas, caída del cabello, pérdida de fuerza, etc.) son tan graves que algunos pacientes preferirían morir de cáncer antes que someterse a esa tortura.

Las nanopartículas pueden cambiar todo esto. Algunos medicamentos como los de la quimioterapia se colocarán dentro de una molécula configurada como una cápsula. La nanopartícula se pone luego en circulación en el flujo sanguíneo, hasta que encuentra su destino concreto y allí libera su medicamento.

La clave de estas nanopartículas[4] es su tamaño: entre 10 y 100 nanómetros, demasiado grandes para penetrar en un glóbulo rojo, por lo que evitan los glóbulos rojos normales sin dañarlos. Pero las células cancerosas son diferentes; sus paredes están llenas de grandes poros irregulares. Las nanopartículas pueden entrar libremente en el interior de las células cancerosas y depositar allí su medicamento, dejando intactos los tejidos sanos. En consecuencia, los médicos no necesitan complicados sistemas de orientación para dirigir las nanopartículas hacia su objetivo. Estas nanopartículas se acumularán de forma natural en ciertos tipos de tumores cancerosos.

Lo bueno de este procedimiento es que no requiere métodos complicados o peligrosos que podrían producir graves efectos secundarios. Estas nanopartículas tienen sencillamente el tamaño correcto: son demasiado grandes para atacar a las células normales, pero son adecuadas para penetrar en las células cancerosas.

Otro ejemplo es el de las nanopartículas creadas por unos científicos de BIND Biosciences en Cambridge, Massachusetts. Sus nanopartículas están hechas de ácido poliláctico y ácido copoliláctico/ácido glicólico, que pueden contener medicamentos dentro de una malla molecular. Esto crea la carga de la nanopartícula. El sistema de guía de la nanopartícula son los péptidos que la recubren y la vinculan específicamente con la célula que es su objetivo.

Lo que resulta especialmente atractivo en este trabajo es que estas nanopartículas se forman por sí mismas, sin requerir fábricas o laboratorios químicos complicados. Los distintos compuestos químicos se mezclan entre sí lentamente, en la sucesión adecuada, en condiciones muy controladas, y las nanopartículas se ensamblan por sí mismas.

«Dado que el autoensamblaje no requiere numerosos pasos químicos complicados, las partículas son muy fáciles de fabricar. […] y podemos fabricarlas por kilos, cosa que nadie más ha hecho», dice Omid Farokhzad, un médico de la

Facultad de Medicina de Harvard, que trabaja para BIND[5]. Estas nanopartículas han demostrado ya que son efectivas contra tumores de próstata, mama y pulmón en las ratas. Utilizando tintes de colores, es posible comprobar que las nanopartículas se acumulan en los órganos en cuestión, liberando su carga del modo deseado. Los ensayos clínicos con pacientes humanos comenzarán dentro de unos pocos años.

LA BÚSQUEDA DE LAS CÉLULAS CANCEROSAS

Estas nanopartículas no solo pueden buscar células cancerosas y depositar medicamentos para matarlas, sino que son realmente capaces de matarlas al instante. El principio que subyace en esto es muy sencillo. Estas nanopartículas pueden absorber luz de una determinada frecuencia. Si se proyecta un láser sobre ellas, se calientan o vibran, destruyendo todas las células cancerosas que haya en su proximidad por el procedimiento de romper las paredes de dichas células. Por lo tanto, la clave está en conseguir que las nanopartículas se acerquen suficientemente a las células cancerosas.

Hay varios grupos que ya han desarrollado prototipos. Unos científicos del Laboratorio Nacional Argonne y de la Universidad de Chicago han creado nanopartículas de dióxido de titanio (el dióxido de titanio es una sustancia química corriente que se encuentra en los protectores solares). Este grupo descubrió que podían vincular estas nanopartículas a un anticuerpo que busca de forma natural ciertas células cancerosas llamadas glioblastoma multiforme (GBM). Por consiguiente, estas nanopartículas llegan hasta las células cancerosas haciéndose transportar por el anticuerpo. Entonces se enciende durante cinco minutos una luz blanca que calienta y finalmente mata las células cancerosas. Los estudios correspondientes han demostrado que un 80 por ciento de las células cancerosas pueden destruirse de este modo.

Estos mismos científicos han desarrollado también un segundo procedimiento para matar células cancerosas. Fabricaron unos diminutos discos magnéticos que pueden vibrar violentamente. Una vez que estos discos son conducidos hasta las células cancerosas, se puede hacer pasar por ellos un pequeño campo magnético externo que les hace agitarse y rasgar las paredes celulares del cáncer. En las pruebas realizadas se consiguió matar un 90 por ciento de las células cancerosas tras solo diez minutos de vibración.

Este resultado no es cuestión de chiripa. Unos científicos de la Universidad de California en Santa Cruz han desarrollado un sistema similar utilizando nanopartículas de oro. Estas partículas tienen un diámetro de entre 20 y 70 nanómetros, un espesor de unos pocos átomos y están dispuestas formando una esfera. Los científicos utilizaron un péptido del que se sabe que es atraído por las células del cáncer de piel. Hicieron que este péptido se incorporara a las

nanopartículas de oro, que luego fueron llevadas hasta las células del cáncer de piel en ratones. Proyectando un láser de infrarrojos, estas partículas de oro podían calentar las células tumorales hasta destruirlas. «Básicamente es como poner una célula cancerosa en agua caliente y hervirla hasta matarla. Cuanto más calor generan las nanoesferas metálicas, mejor es el resultado», dice Jin Zhang, uno de los investigadores[6].

Así pues, en el futuro la nanotecnología detectará las colonias de células cancerosas décadas antes de que puedan formar un tumor, y podrán utilizarse unas nanopartículas que circularán por nuestra sangre para destruir esas células. Actualmente se está haciendo la ciencia que pone las bases para esos logros futuros.

NANOCOCHES EN NUESTRA SANGRE

Un paso más allá de las nanopartículas es el nanocoche, un dispositivo que realmente puede guiarse para que viaje por el interior del cuerpo. Mientras la nanopartícula puede viajar libremente por el flujo sanguíneo, estos nanocoches son como aviones teledirigidos, es decir, pueden ser gobernados y pilotados por control remoto.

James Tour y sus colegas de la Universidad Rice han construido uno de estos nanocoches. En vez de ruedas, el nanocoche tiene cuatro *buckyballs*. Uno de los objetivos futuros de esta investigación es diseñar un coche molecular que pueda empujar a un diminuto robot por todo el flujo sanguíneo, buscando células cancerosas por el camino o depositando medicamentos salvadores en ubicaciones precisas del cuerpo.

Un problema que presenta el nanocoche es que no tiene motor. Los científicos han creado máquinas moleculares cada vez más sofisticadas, pero una de las barreras más importantes con que se han encontrado ha sido la creación de una fuente molecular de energía. La madre naturaleza ha resuelto este problema utilizando la molécula de trifosfato de adenosina o adenosina trifosfato (ATP) como fuente de energía. La energía del ATP hace posible la vida; cada segundo proporciona energía para nuestros movimientos musculares. Esta energía del ATP se almacena en un enlace químico entre sus átomos. Sin embargo, se ha comprobado que es difícil crear una alternativa sintética.

Thomas Mallouk y Ayusman Sen, de la Universidad del Estado de Pensilvania, han encontrado una potencial solución para este problema. Han creado un nanocoche que puede moverse a decenas de micras por segundo, que es la velocidad de la mayoría de las bacterias. (En primer lugar, crearon una nanobarra, hecha de oro y platino, del tamaño de una bacteria. Colocaron la nanobarra en una mezcla de agua y peróxido de hidrógeno. Esto produjo en cada extremo de la nanobarra una reacción química que hizo que los protones se desplazaran de un extremo a otro. Dado que los protones ejercen un empuje contra las cargas eléctricas de la molécula de agua, esto

propulsa la barra hacia delante. La barra no deja de moverse hacia delante mientras haya peróxido de hidrógeno en el agua).

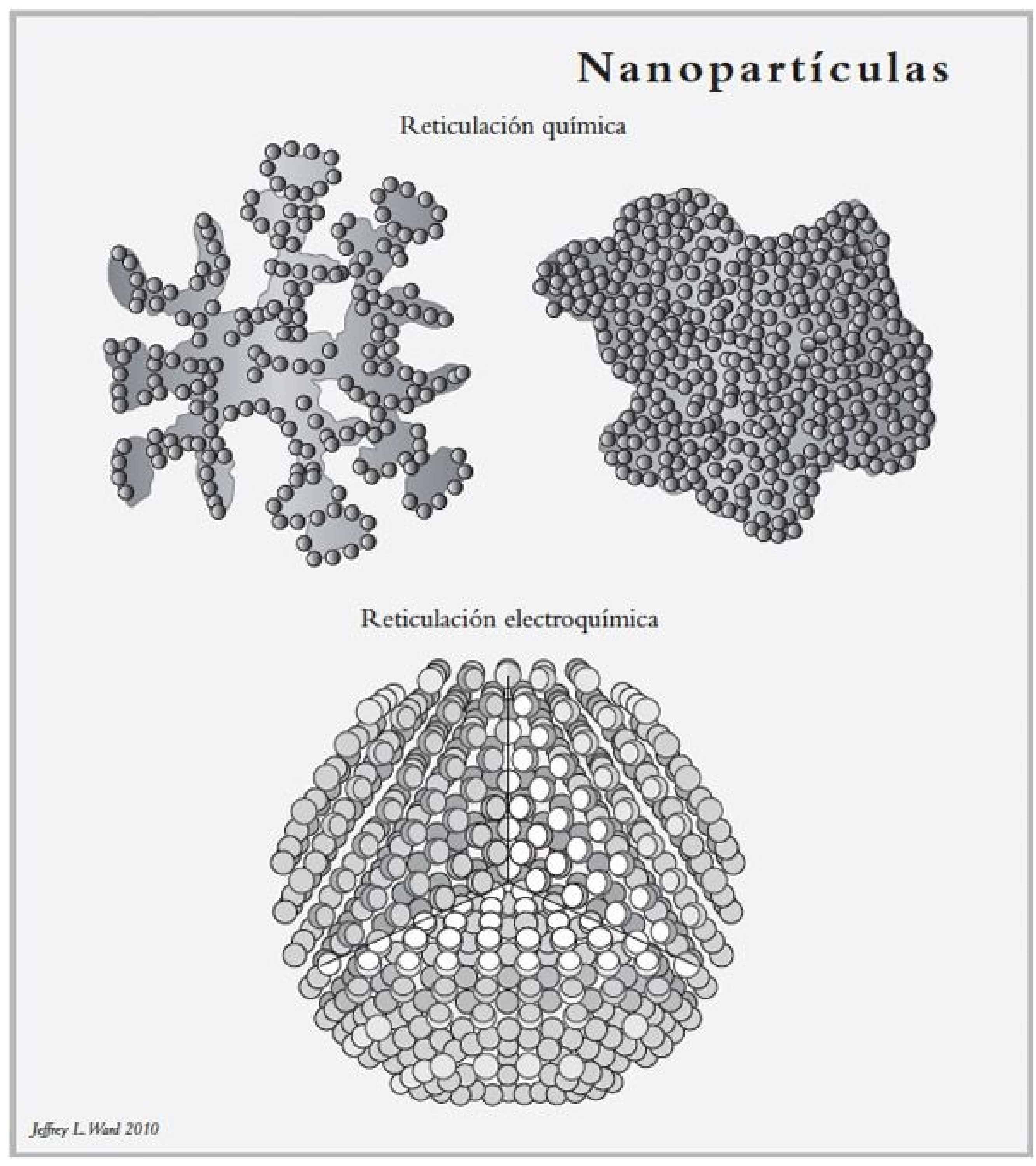
También es posible dirigir estas nanobarras utilizando el magnetismo. Algunos científicos han empotrado discos de níquel en el interior de estas nanobarras, con lo que actúan como la aguja de una brújula. Moviendo un vulgar imán de frigorífico cerca de las nanobarras, podemos guiarlas en la dirección que deseemos.

Otro modo de guiar una máquina molecular es utilizar una luz de flash[7]. La luz puede romper las moléculas descomponiéndolas en iones positivos y negativos. Estos dos tipos de iones se propagan a través del medio a velocidades diferentes, lo cual genera un campo eléctrico. Entonces las máquinas moleculares son atraídas por estos campos eléctricos. Así, apuntando con la luz, es posible dirigir las máquinas moleculares en la dirección deseada.

Contemplé una demostración de esto cuando visité el laboratorio de Sylvain Martel en el Politécnico de Montreal, en Canadá. Su idea era utilizar los flagelos de las bacterias ordinarias para propulsar un diminuto chip hacia delante por el flujo sanguíneo. Hasta ahora, los científicos han sido incapaces de fabricar un motor atómico como el descubierto en los flagelos de las bacterias. Martel se hacía la siguiente pregunta: Si la nanotecnología no ha podido fabricar estos flagelos diminutos, ¿por qué no utilizar unos flagelos de bacterias vivas?

Primero creó un chip informático menor que el punto que aparece al final de esta frase. Luego cultivó una remesa de bacterias. Consiguió colocar unas ochenta de estas bacterias detrás del chip, de modo que actuaran como propulsores para empujar el chip hacia delante. Dado que las bacterias eran ligeramente magnéticas, Martel pudo usar imanes externos para guiarlas hacia donde quisiera.

Tuve ocasión de guiar yo mismo estos chips impulsados por bacterias. Miré por el microscopio y vi un diminuto chip informático que se movía empujado por varias bacterias. Cuando pulsé un botón, un imán giró, y el chip se desplazó hacia la derecha. Al soltar el botón, el chip se detuvo y luego empezó a moverse aleatoriamente. De este modo, fui realmente capaz de dirigir el chip. Mientras lo hacía, pensé que algún día un médico pulsaría un botón similar, pero en ese caso sería para dirigir a un nanorrobot por las venas de un paciente.



Unos robots moleculares patrullarán por nuestro flujo sanguíneo, buscando e identificando células cancerosas y agentes patógenos. Será una auténtica revolución dentro de la medicina.

Podemos imaginar un futuro en el que la cirugía sea sustituida del todo por máquinas moleculares que se desplacen por el flujo sanguíneo guiadas por imanes para afincarse en un órgano enfermo y allí liberar medicamentos o realizar una cirugía. Esto haría que cortar la piel fuera algo totalmente obsoleto. También podría ser que unos imanes guiaran estas nanomáquinas hasta el corazón con el fin de eliminar un bloqueo de las arterias.

CHIPS DE ADN

Como ya se ha mencionado en el capítulo 3, en el futuro llevaremos diminutos sensores en la ropa y el cuerpo, y también los tendremos en el cuarto de baño, con el fin de monitorizar constantemente nuestra salud y detectar enfermedades como el cáncer años antes de que estas se conviertan en un peligro. La clave de todo esto es el chip de ADN, que promete «un laboratorio en un chip». Al igual que el *tricorder* de *Star Trek*, estos diminutos sensores nos proporcionarán un análisis médico en cuestión de minutos.

Hoy en día, hacer un chequeo para detectar un cáncer es un proceso largo, costoso y laborioso que a menudo tarda semanas. Esto limita enormemente el número de reconocimientos que pueden hacerse para la detección del cáncer. Sin embargo, la tecnología informática está cambiando todo esto. Los científicos ya están creando dispositivos que pueden detectar el cáncer con rapidez y a bajo costo, mediante la búsqueda de ciertos biomarcadores producidos por las células cancerosas.

Mediante la misma tecnología de grabado que se utiliza para fabricar los chips informáticos, es posible grabar un chip en el que haya instalaciones microscópicas que puedan detectar secuencias específicas de ADN o células cancerosas.

Utilizando la tecnología de grabado de transistores, se encajan unos fragmentos de ADN dentro del chip. Cuando ciertos fluidos pasan sobre el chip, estos fragmentos de ADN pueden unirse a secuencias específicas de genes. Luego, utilizando un rayo láser, se puede escanear rápidamente toda la zona e identificar esos genes. De este modo, no es preciso examinar todos los genes de uno en uno, como se hacía antes, sino que pueden escanearse por miles al momento.

En 1997, la empresa Affymetrix puso en el mercado el primer chip comercial de ADN que podía analizar rápidamente 50.000 secuencias de ADN. En 2000 estaban disponibles 400.000 pruebas de ADN por unos pocos miles de dólares. En 2002, los precios habían caído hasta los 200 dólares por unos chips aún más potentes. Los precios continúan cayendo hasta llegar a unos pocos dólares a causa de la ley de Moore.

Shana Kelley, profesora de la Facultad de Medicina de la Universidad de Toronto, dijo: «Hoy en día se necesita una habitación llena de ordenadores para evaluar una muestra de biomarcadores de cáncer clínicamente relevante, y los resultados tardan en estar disponibles. Nuestro equipo podía medir biomoléculas en un chip electrónico del tamaño de la yema de un dedo[8]». Entre sus previsiones está el día en que todo el equipo necesario para analizar este chip se reducirá al tamaño de un teléfono portátil. Este laboratorio ubicado en un chip hará que podamos reducir cualquier laboratorio químico de un hospital o una universidad a un solo chip que podremos utilizar en nuestro cuarto de baño.

Unos médicos del Hospital General de Massachusetts han creado su propio biochip hecho a medida, que es 100 veces más potente que cualquiera de los que se

encuentran hoy en el mercado. Normalmente, las células tumorales circulantes (CTC) constituyen una proporción de menos de una entre un millón de células en nuestra sangre, pero estas CTC acabarían por matarnos si proliferaran. El nuevo biochip es lo bastante sensible como para encontrar una CTC entre mil millones que circulen por nuestra sangre. Por consiguiente, se ha demostrado que este chip detecta células tumorales en los cánceres de pulmón, de próstata, de páncreas, de mama y colorrectal analizando solamente la cantidad de sangre que cabría en una cucharilla de té.

La tecnología de grabado estándar graba unos chips que contienen 78.000 espigas microscópicas (cada una de una altura de 100 micras). Al mirar uno de estos chips mediante un microscopio electrónico, se ve como un bosque de espigas redondas. Cada espiga está recubierta con un anticuerpo contra las moléculas de adhesión a células epiteliales (EpCAM: *epithelial cell adhesion molecule*), que se encuentran en muchos tipos de células cancerosas, pero no aparecen en las células normales. La EpCAM es vital para que las células cancerosas se comuniquen entre sí mientras forman un tumor. Cuando la sangre pasa por el chip, las CTC se adhieren a las espigas redondas. En diversos ensayos clínicos, el chip ha logrado detectar cánceres en 115 de 116 pacientes.

La proliferación de estos laboratorios montados en un chip incidirá drásticamente en el coste a la hora de diagnosticar la enfermedad. Una biopsia o un análisis químico pueden costar ahora varios cientos de dólares y tardar unas cuantas semanas. En el futuro podrá costar unos cuantos peniques y se hará en pocos minutos. Esto revolucionaría la velocidad y la accesibilidad de los diagnósticos de cáncer. Cada vez que nos cepillemos los dientes, estaremos haciendo un chequeo minucioso para detectar toda una variedad de enfermedades, incluido el cáncer.

Leroy Hood y sus colegas de la Universidad de Washington crearon un chip de unos 4 centímetros que puede comprobar la presencia de unas proteínas específicas en una sola gota de sangre. Las proteínas son los ladrillos que construyen la vida. Nuestros músculos, nuestra piel, nuestro pelo, nuestras hormonas y enzimas están hechos de proteínas. Detectar en el cuerpo las proteínas de enfermedades como el cáncer puede conducir a un sistema de alerta precoz. Actualmente, este chip cuesta solo diez centavos de dólar y puede identificar una proteína específica en diez minutos, por lo que es varios millones de veces más eficiente que el sistema anterior. Hood prevé que algún día un chip podrá analizar con rapidez cientos de miles de proteínas, alertándonos con respecto a una amplia variedad de enfermedades años antes de que estas lleguen a ser graves.

NANOTUBOS DE CARBONO

Los nanotubos de carbono nos ofrecen un avance del poder que puede llegar a alcanzar la nanotecnología. En principio, los nanotubos de carbono son más fuertes

que el acero y también pueden conducir la electricidad, por lo que existe la posibilidad de fabricar ordenadores tomando como base el carbono. Aunque los nanotubos son tremendamente resistentes, un problema es que el carbono tiene que utilizarse en estado puro, y la fibra de carbono más larga es de solo unos pocos centímetros. Pero llegará el día en que se pueda fabricar ordenadores completos con nanotubos de carbono y otras estructuras moleculares.

Los nanotubos de carbono están hechos de átomos de carbono unidos de uno en uno para formar un tubo. Imaginemos un alambre de gallinero donde cada unión de la malla de alambre es un átomo de carbono. Luego se enrolla esa malla a modo de tubo, y ya tenemos la forma geométrica de un nanotubo de carbono. Los nanotubos de carbono se forman cada vez que se produce hollín corriente, pero los científicos nunca se habían dado cuenta de que los átomos de carbono podían unirse de una manera tan original.

Las propiedades casi milagrosas de los nanotubos de carbono se deben a su estructura atómica. Habitualmente, cuando analizamos un trozo de materia sólida, como una roca o un pedazo de madera, lo que realmente estamos analizando es un enorme compuesto de muchas estructuras que se sobreponen. Es fácil crear unas fracturas diminutas dentro de este compuesto, lo cual hace que se rompa. Así, la resistencia de un material depende de las imperfecciones que haya en su estructura molecular. Por ejemplo, el grafito está hecho de carbono puro, pero es extremadamente blando porque está formado por capas que pueden deslizarse la una sobre la otra. Cada capa está formada por átomos de carbono, de tal modo que cada uno de estos está unido a otros tres átomos de carbono.

También los diamantes están hechos de carbono puro, pero son el mineral más duro que se encuentra en la naturaleza. En los diamantes los átomos de carbono están ordenados en una estructura cristalina apretada y bien trabada, que es lo que da a este mineral su extraordinaria resistencia. De manera similar, los nanotubos de carbono deben sus sorprendentes propiedades a su estructura atómica regular.

Los nanotubos de carbono ya se están abriendo camino en la industria. A causa de su conductividad pueden utilizarse para fabricar cables que transportan grandes cantidades de energía eléctrica. Por su resistencia pueden utilizarse para crear sustancias aún más duras que el Kevlar.

Pero será tal vez en la industria informática donde un día se dé la aplicación más importante del carbono. El carbono es uno de los posibles candidatos a suceder al silicio como base de la tecnología informática. Puede que el futuro de la economía mundial dependa finalmente de la pregunta: ¿Qué será lo que sustituya al silicio?

LA ERA POSTSILICIO

Como se ha mencionado antes, la ley de Moore, uno de los fundamentos de la revolución en la información, no puede durar eternamente. Puede que el futuro de la economía mundial y el destino de las naciones dependan en última instancia de cuál sea la nación que desarrolle un sustituto adecuado del silicio.

La pregunta «¿Cuándo se acabará la vigencia de la ley de Moore?» produce escalofríos en la economía mundial[9]. Al propio Gordon Moore le preguntaron en 2007 si pensaba que la ley que lleva su nombre duraría eternamente. Su respuesta fue que no, por supuesto, y predijo que se acabaría en diez o quince años. Esta tajante afirmación concordaba con una estimación previa realizada por Paolo Gargini, un miembro del consejo de administración de Intel, responsable de la investigación externa de esta empresa. Dado que Intel Corporation determina la dirección en que se mueve toda la industria de semiconductores, las palabras de Gargini fueron objeto de un minucioso análisis. En 2004, durante la conferencia anual de Semicon West, Paolo Gargini dijo: «Vemos que al menos durante los próximos quince o veinte años podemos seguir aceptando la ley de Moore[10]».

La revolución actual de los ordenadores basados en el silicio ha sido impulsada por un hecho esencial: la capacidad de la luz ultravioleta de grabar transistores cada vez más pequeños sobre una oblea de silicio. Hoy en día, un chip de Pentium puede tener varios cientos de millones de transistores en una oblea del tamaño de la uña de un pulgar. Puesto que la longitud de onda de la luz ultravioleta puede reducirse hasta 10 nanómetros, es posible utilizar unas técnicas de grabado que tallen unos componentes cuyo diámetro sea de solo treinta átomos. Pero este proceso no puede continuar indefinidamente. Antes o después se acabará, por diversas razones.

En primer lugar, el calor generado por unos chips muy potentes podría llegar a fundirlos. Una solución ingenua es apilar las obleas una encima de otra, creando un chip cúbico. Esto aumentaría la capacidad de procesamiento, pero a expensas de generar más calor. El calor de estos chips cúbicos es tan intenso que se podría freír un huevo encima de ellos. El problema es sencillo: en un chip cúbico no hay superficie suficiente para enfriarlo. En general, si hacemos circular agua o aire fríos por un chip caliente, el efecto de enfriamiento es mayor cuando hay más superficie de contacto con el chip. Ahora bien, si utilizamos un chip cúbico, la superficie no es suficiente. Por ejemplo, si pudiéramos multiplicar por dos el tamaño de un chip cúbico, el calor generado aumentaría multiplicándose por ocho (ya que el cubo contendría ocho veces más componentes eléctricos), pero su superficie se multiplicaría solo por cuatro. Esto significa que el calor generado en un chip cúbico crece más rápido que las posibilidades de refrigerarlo. Cuanto mayor sea el tamaño del chip cúbico, más difícil será enfriarlo. Por lo tanto, los chips cúbicos aportarán solo una solución parcial y temporal al problema.

Algunos han sugerido que se puede utilizar simplemente rayos X en lugar de luz ultravioleta para grabar los circuitos. En principio, esto podría dar buen resultado, ya que los rayos X pueden tener una longitud de onda 100 veces menor que la de la luz

ultravioleta. Pero hay un inconveniente. Al sustituir la luz ultravioleta por los rayos X, aumenta también la energía del rayo multiplicándose aproximadamente por 100. Esto significa que grabar mediante rayos X puede destruir la oblea. La litografía mediante rayos X puede compararse con el intento de un artista de crear una delicada escultura utilizando un soplete. La litografía mediante rayos X ha de controlarse muy cuidadosamente, por lo que esta técnica no sería más que una solución a corto plazo.

En segundo lugar, hay un problema fundamental que plantea la teoría cuántica: el principio de incertidumbre, según el cual no se puede conocer al mismo tiempo y con precisión la ubicación y la velocidad de un átomo o una partícula cualesquiera. El chip actual de Pentium puede tener una capa de unos treinta átomos de espesor. En 2020, ese espesor podrá ser de cinco átomos, de modo que los electrones, cuya posición es incierta, empiecen a escapar a través de la capa, causando un cortocircuito. Por lo tanto, hay un límite cuántico para la reducción de tamaño de un transistor de silicio.

Como ya he mencionado con anterioridad, en una ocasión pronuncié el discurso inaugural de un importante congreso al más alto nivel en el que participaban 3.000 ingenieros de Microsoft en su central de Seattle. En mi discurso expuse el problema que plantea la deriva descendente de la ley de Moore. Aquellos ingenieros de alto nivel, expertos en programas informáticos, me aseguraron confidencialmente que estaban tomándose muy en serio el problema, y que el procesamiento paralelo era una de las mejores soluciones para aumentar la capacidad de procesamiento de los ordenadores. El modo más sencillo de resolver este problema es ensartar una serie de chips en paralelo, de modo que cualquier problema informático se descomponga en partes y luego, al final, se vuelvan a ensamblar estas partes.

El procesamiento paralelo es una de las claves para comprender cómo funciona nuestro propio cerebro. Si hacemos un escaneado por IRM del cerebro cuando este está pensando, descubriremos que varias regiones del cerebro se encienden simultáneamente, lo cual significa que el cerebro descompone su tarea en pequeñas porciones y las procesa por separado simultáneamente. Esto explica por qué las neuronas (que transportan mensajes eléctricos a una velocidad insoportablemente lenta de 300 kilómetros por hora) pueden superar a un ordenador, a pesar de que en este los mensajes viajan casi a la velocidad de la luz. Lo que le falta en velocidad, nuestro cerebro lo compensa realizando miles de millones de pequeños cálculos al mismo tiempo y reuniéndolos después en un todo coherente.

La dificultad que plantea el procesamiento paralelo es que todo problema ha de ser descompuesto en varias partes. Luego, cada parte es procesada mediante chips diferentes y, al final, se hace un reensamblaje del problema. La coordinación de este fraccionamiento puede ser excesivamente complicada y depende de manera específica de cómo sea cada problema, por lo que es muy difícil encontrar un procedimiento general. El cerebro humano hace esto sin esfuerzo, pero la madre

naturaleza dispuso de millones de años para resolver el problema. Los ingenieros que diseñan programas informáticos solo disponen de, más o menos, una década.

TRANSISTORES ATÓMICOS

Un posible sustituto de los chips de silicio son los transistores hechos de átomos individuales. Si los transistores de silicio fallan porque los cables y las capas de un chip se van reduciendo en tamaño hasta la escala de los átomos, entonces ¿por qué no empezar todo desde el principio y calcular en átomos?

Un modo de hacer esto es utilizar transistores moleculares. Un transistor es un interruptor que permite controlar el flujo de corriente eléctrica que pasa por un cable. Cabe la posibilidad de sustituir un transistor de silicio por una sola molécula de sustancias químicas tales como el rotaxano y el bencenotiol. Si miramos una molécula de bencenotiol, su aspecto es el de un largo tubo que tiene en el centro un «botón» o válvula hecha de átomos. Normalmente, la electricidad fluye libremente por el tubo, convirtiéndolo en un conductor. Pero también es posible girar el «botón», con lo que se corta el flujo eléctrico. De este modo, la molécula actúa toda ella como un interruptor que puede controlar el paso de la corriente. En una posición, el interruptor permite que pase la electricidad, lo cual representa el número «1». Si el botón se gira a la otra posición, se detiene el flujo eléctrico, que representa el número «0». De esta manera pueden enviarse mensajes digitales utilizando moléculas.

Los transistores moleculares existen ya. Varias empresas han anunciado el diseño de transistores hechos de moléculas individuales. Antes de que sean comercialmente viables, es preciso cablearlos correctamente y conseguir la producción en masa.

Una prometedora candidata para el transistor molecular es una sustancia llamada grafeno. En 2004, Andre Geim y Kostya Novosiólov, de la Universidad de Manchester, aislaron por primera vez esta sustancia a partir del grafito, por lo que les fue concedido el premio Nobel. El grafeno es como una sola capa de grafito. A diferencia de los nanotubos de carbono, que son hojas de átomos de carbono enrolladas para formar tubos largos y estrechos, el grafeno es una sola hoja de carbono con no más de un átomo de espesor. Al igual que los nanotubos de carbono, el grafeno representa un nuevo estado de la materia, por lo que los científicos están trabajando para descifrar sus notables propiedades, incluida la conductividad eléctrica. «Desde el punto de vista de la física, el grafeno es una mina de oro. Nunca acaba uno de estudiarlo», señala Novosiólov[11]. (El grafeno es también el material más resistente que la ciencia ha probado. Si ponemos un elefante sobre un lápiz y hacemos que este lápiz oscile sobre una hoja de grafeno, la hoja no se rasga).

Empleando las técnicas utilizadas habitualmente en la industria informática, el grupo de Novosiólov ha grabado algunos de los transistores más pequeños que se han hecho nunca. Unos finos haces electrónicos pueden grabar canales en el grafeno,

haciendo así el transistor más pequeño del mundo: con un átomo de espesor y diez átomos de diámetro. (Actualmente, los transistores moleculares más pequeños miden unos 30 nanómetros. Los transistores de menor tamaño que ha hecho Novosiólov son treinta veces más pequeños que aquellos).

De hecho, estos transistores de grafeno son tan pequeños que pueden representar el límite definitivo para los transistores moleculares. Si se hace alguno aún más pequeño, el principio de incertidumbre interviene, y los electrones escapan del transistor, destruyendo sus propiedades. «Viene a ser lo mínimo que se puede conseguir», dice Novosiólov[12].

Aunque son varios los posibles candidatos a convertirse en transistores moleculares, el problema real es más prosaico: cómo cablearlos y ensamblarlos en un producto que sea comercialmente viable. No basta con crear un solo transistor molecular. Los transistores moleculares tienen fama de ser difíciles de manipular, ya que pueden ser miles de veces más finos que un pelo humano. Es una pesadilla discurrir los posibles modos de producirlos en masa. Hoy por hoy, la tecnología no está aún a la altura.

Por ejemplo, el grafeno es un material nuevo que los científicos no saben cómo producir en grandes cantidades. Solo consiguen producir alrededor de 0,1 milímetros de grafeno puro, lo cual es demasiado poco para un uso comercial. La esperanza está puesta en descubrir un proceso que monte automáticamente el transistor molecular. En la naturaleza encontramos a veces disposiciones de moléculas que se condensan en un dibujo preciso como por arte de magia. Hasta ahora, nadie ha sido capaz de recrear con fiabilidad esta magia.

ORDENADORES CUÁNTICOS

La propuesta más ambiciosa es utilizar ordenadores cuánticos que calculen y procesen realmente con los propios átomos. Algunos afirman que los ordenadores cuánticos son los ordenadores definitivos, ya que el átomo es la unidad más pequeña con la que se puede calcular.

Un átomo es como una peonza que gira. Normalmente se puede almacenar información digital en las peonzas asignando el número «0» si la peonza gira hacia arriba (espín hacia arriba), o el «1» si la peonza gira hacia abajo (espín hacia abajo). Si le damos un vuelco a la peonza que gira, habremos convertido un 0 en un 1, con lo que habremos realizado una operación.

Sin embargo, en el extraño mundo de lo cuántico, un átomo gira, en cierto sentido, hacia arriba y hacia abajo de forma simultánea. (En el mundo cuántico estar en varios lugares a la vez es cosa corriente). Por consiguiente, un átomo puede contener mucha más información que un 0 o un 1. Puede expresar una mezcla de ceros y unos. Así, los ordenadores cuánticos utilizan «qubits» en vez de bits. Por

ejemplo, el átomo puede estar girando con espín o giro hacia arriba en un 25 por ciento, y con espín o giro hacia abajo en un 75 por ciento. De esta manera, un átomo que gira puede almacenar una cantidad de información muchísimo mayor que un solo bit.

Los ordenadores cuánticos son tan potentes que la CIA ha estado examinando su potencial para descifrar códigos. Cuando la CIA intenta descifrar el código de otra nación, lo que hace es buscar la clave. Las naciones han desarrollado procedimientos muy ingeniosos para configurar la clave que codifica sus mensajes. Por ejemplo, esa clave puede basarse en la factorización de un número grande. Es fácil factorizar el número 21 como el producto de 3 y 7. Pero digamos que tenemos un número de 100 dígitos y le pedimos a un ordenador digital que nos lo escriba como el producto de otros dos números. Un ordenador digital puede tardar un siglo en factorizar este número. Sin embargo, un ordenador cuántico es tan potente que, en principio, puede descifrar sin esfuerzo cualquiera de esos códigos. Un ordenador cuántico supera claramente a un ordenador digital a la hora de realizar estas tareas enormes.

Los ordenadores cuánticos no son ciencia ficción, porque hoy en día ya existen en la realidad. De hecho, tuve ocasión de ver por mí mismo un ordenador cuántico cuando visité el laboratorio del MIT donde trabaja Seth Lloyd, uno de los pioneros en este campo. Su laboratorio está lleno de ordenadores, bombas de vacío y sensores, pero el núcleo de su experimento es un aparato que se parece a un escáner de IRM, solo que de mucho menor tamaño. Como el aparato de IRM, este artilugio tiene dos grandes bobinas de cable que crean un campo magnético uniforme en el espacio que queda libre entre ellas. En este campo magnético uniforme Lloyd coloca el material de la muestra. Los átomos que hay dentro de esta se alinean, como peonzas que giran. Si el átomo apunta hacia arriba, corresponde a un 0. Si señala hacia abajo, corresponde a un 1. A continuación, Lloyd envía un pulso electromagnético hacia la muestra, con lo que cambia el alineamiento de los átomos. Algunos de estos dan un vuelco, y así un 1 se convierte en un 0. De esta manera, el aparato ha realizado un cálculo.

Entonces, ¿por qué no tenemos sobre nuestras mesas ordenadores cuánticos que resuelvan los misterios del universo? Lloyd reconoció que el verdadero problema que obstaculiza la investigación en los ordenadores cuánticos son las interferencias procedentes del mundo exterior, que destruyen las delicadas propiedades de esos átomos.

Cuando los átomos son «coherentes» y vibran en fase unos con otros, la más mínima interferencia que les llegue del mundo exterior puede arruinar este delicado equilibrio y hacer que los átomos pierdan su «coherencia», dejando de vibrar al unísono. Incluso el paso de un rayo cósmico o el retumbe de un camión fuera del laboratorio pueden destruir el delicado alineamiento giratorio de los átomos y arruinar los cálculos.

El problema de la pérdida de coherencia o «decoherencia cuántica» es un único obstáculo de dificultad extrema para crear ordenadores cuánticos. Quien logre resolver este problema, no solo ganará un premio Nobel, sino que se convertirá también en la persona más rica del planeta.

Está claro que crear ordenadores cuánticos a partir de átomos individuales coherentes es un proceso arduo, porque esos átomos pierden la coherencia y dejan de vibrar en fase rápidamente. Hasta ahora, el cálculo más complejo realizado por un ordenador cuántico en todo el mundo es 3 × 5 = 15. Aunque esto no parezca gran cosa, recordemos que el cálculo se hizo con átomos individuales.

Hay además otra complicación extraña que procede de la teoría cuántica y se basa, una vez más, en el principio de incertidumbre. Todos los cálculos realizados en un ordenador cuántico son inciertos, por lo que habría que repetir el experimento muchas veces. Por consiguiente, 2 + 2 = 4, al menos algunas veces. Si se repite el cálculo 2 + 2 cierto número de veces, la respuesta final da como media 4. Incluso la aritmética se convierte en algo difuso en un ordenador cuántico.

Nadie sabe cuándo se podrá resolver el problema de la decoherencia. Vint Cerf, uno de los creadores iniciales de internet, predice que «en 2050, seguramente habremos encontrado la manera de realizar cálculos cuánticos a temperatura ambiente[13]».

Hay que destacar también que, como la recompensa es tan elevada, los científicos han explorado toda una variedad de diseños de ordenadores. Algunos de los diseños que actualmente compiten entre sí son los siguientes:

- **Ordenadores ópticos**: Estos ordenadores calculan con haces luminosos en vez de electrones. Dado que los haces de luz pueden pasar los unos a través de los otros, los ordenadores ópticos tienen la ventaja de que pueden ser cúbicos y sin cables. Además, es posible fabricar láseres utilizando las mismas técnicas litográficas que en los transistores ordinarios, por lo que en teoría se pueden meter millones de láseres en un chip.
- **Ordenadores de puntos cuánticos**: Los semiconductores utilizados en los chips pueden grabarse en puntos diminutos, tan pequeños que son una colección de quizá 100 átomos. Estos átomos pueden empezar entonces a vibrar al unísono. En 2009 se hizo el punto cuántico más pequeño del mundo con un solo electrón. Estos puntos cuánticos han demostrado ya su utilidad en los diodos emisores de luz y en los monitores de los ordenadores. En el futuro, si estos puntos cuánticos se organizan adecuadamente, podrían incluso servir para la creación de un ordenador cuántico.
- **Ordenadores de ADN**: En 1994, en la Universidad del Sur de California, se creó el primer ordenador hecho de moléculas de ADN. Dado que un hilo de ADN codifica información en los aminoácidos representados por las letras A,

T, C y G, en vez de codificarla con ceros y unos, el ADN puede considerarse como una cinta magnética corriente de ordenador, salvo por el hecho de que puede almacenar más información. Del mismo modo que un ordenador puede manipular y reordenar un gran número digital, también pueden realizarse manipulaciones análogas mezclando tubos de fluidos que contienen ADN, ya que este puede cortarse y empalmarse de diversas maneras. Aunque el proceso es lento, el hecho de que haya tantos billones de moléculas de ADN actuando simultáneamente hace que un ordenador de ADN pueda resolver determinados cálculos de una manera más ventajosa que un ordenador digital. Aunque un ordenador digital tiene muchas ventajas y puede colocarse dentro de un teléfono móvil, los ordenadores de ADN son más engorrosos porque requieren hacer mezclas con tubos de líquido que contienen ADN.

MEDIADOS DE SIGLO (DESDE 2030 HASTA 2070)

CAMBIOS DE FORMA

En la película *Terminator 2: el Juicio Final*, Arnold Schwarzenegger sufre el ataque de un avanzado robot del futuro, un T1000, que está hecho de metal líquido. Dado que es como una masa temblorosa de mercurio, el robot puede cambiar de forma y deslizarse abriéndose paso a través de un obstáculo. Consigue filtrarse por las grietas más finas y configurar armas mortales reestructurando sus manos y pies. Después puede volver de repente a su forma original para seguir con su violencia asesina. El T1000 parece ser imparable, una máquina de matar perfecta.

Todo esto era ciencia ficción, por supuesto. La tecnología actual no permite cambiar un objeto sólido a voluntad. Sin embargo, a mediados de siglo tal vez llegue a ser corriente alguna forma de esta tecnología del cambio de forma. De hecho, una de las principales empresas que impulsan esta tecnología es Intel.

Paradójicamente, en 2050 los frutos de la nanotecnología estarán en su mayoría por doquier, pero escondidos, no a la vista. Casi todos los productos se optimizarán mediante las técnicas moleculares de fabricación, con lo cual serán superfuertes, resistentes, conductores y flexibles. La nanotecnología nos proporcionará asimismo unos sensores que nos protegerán y nos ayudarán constantemente, y estarán repartidos por nuestro entorno, ocultos, bajo la superficie de nuestra consciencia. Caminaremos calle abajo y nos parecerá que todo está como siempre, por lo que nunca sabremos cómo ha cambiado la tecnología el mundo que nos rodea.

Pero hay una consecuencia de la tecnología que será obvia.

El robot asesino de *Terminator*, T1000, es quizá el ejemplo más trágico de objeto procedente de lo que se llama materia programable, que nos permitirá algún día cambiar el color y la forma física de un objeto pulsando un botón. En un nivel más primitivo, incluso un rótulo de neón es una forma de materia programable, ya que podemos mover un interruptor y enviar una corriente eléctrica a través de un tubo de gas. La electricidad excita los átomos de gas, que luego vuelven a su estado normal, emitiendo luz durante este proceso. Una versión más sofisticada de esto es la pantalla LCD que tienen ahora todos los monitores de ordenador. El LCD contiene un cristal líquido que se vuelve opaco cuando se le suministra una pequeña corriente eléctrica. Así, regulando la corriente eléctrica que fluye dentro del cristal líquido, se puede crear colores y formas en una pantalla pulsando un botón.

Los científicos de Intel son mucho más ambiciosos. Se proponen utilizar materia programable para cambiar de manera real la forma de un objeto sólido, exactamente igual que en ciencia ficción. La idea es sencilla: se trata de crear un chip informático con la forma de un diminuto grano de arena. Estos granos de arena inteligentes nos permiten cambiar la carga de electricidad estática de la superficie, de modo que los granos puedan atraerse o repelerse entre sí. Con un conjunto determinado de cargas, estos granos se alinean para colocarse en una determinada formación. Pero podemos reprogramarlos de tal manera que sus cargas eléctricas cambien, con lo cual se colocan en una formación completamente diferente. Estos granos se llaman «cátomos» (*catoms*: una contracción de *claytronic atoms* o átomos claytrónicos[*]), ya que pueden formar una amplia variedad de objetos sin más que cambiar sus cargas, de una manera muy parecida a lo que hacen los átomos. (La materia programable tiene mucho en común con los robots modulares que hemos visto en el capítulo 2. Mientras los robots modulares contienen bloques inteligentes de unos 5 centímetros, que pueden recolocarse ellos mismos, la materia programable reduce los bloques que la forman a dimensiones inferiores al milímetro, y aún menores)[*].

Uno de los promotores de esta tecnología es Jason Campbell, un veterano investigador de Intel. Campbell dice: «Pensemos en un dispositivo portátil. Mi teléfono móvil es demasiado grande para caber cómodamente en el bolsillo, y demasiado pequeño para mis dedos. Es aún peor cuando intento ver películas o gestionar mi correo electrónico. Pero si yo tuviera entre 200 y 300 mililitros de cátomos, podría darle la forma del aparato que necesito en cada momento[14]». Así, en un momento dado tendría un teléfono móvil en la mano. A continuación, se convertiría en otra cosa. De esta manera, no tendría que llevar tantos aparatos electrónicos.

En sus laboratorios Intel ha creado ya una formación de cátomos que miden unos dos centímetros y medio. El cátomo se parece a un cubo con muchos electrodos diminutos repartidos de manera uniforme por sus caras. Lo que hace único al cátomo es que se puede cambiar la carga en cada uno de sus electrodos, de modo que los cátomos se unan unos a otros con distintas orientaciones. Con un conjunto

determinado de cargas, los cubos podrían combinarse para crear un gran cubo. Cambiando las cargas en cada electrodo, los cátomos se desarman y vuelven a reorganizarse por sí mismos para configurar una forma completamente diferente, como podría ser la de un barco.

Lo que interesa es reducir cada cátomo al tamaño de un grano de arena, o incluso menos. Si algún día las técnicas para grabar en silicio nos permiten crear cátomos que sean tan pequeños como una célula, podríamos ser capaces de cambiar en el mundo real una forma por otra pulsando un botón. Justin Rattner, un veterano miembro de Intel, dice: «En algún momento durante los próximos cuarenta años, esto se convertirá en tecnología habitual[15]». Tendría aplicación inmediata para los diseñadores de automóviles, los ingenieros aeronáuticos, los artistas plásticos, los arquitectos, y para cualquiera que tuviera que diseñar modelos tridimensionales de sus proyectos y luego modificarlos continuamente. Por ejemplo, si modelamos un sedán de cuatro puertas, podremos agarrar el modelo, estirarlo y, en un momento, convertirlo en un *hatchback* o vehículo de cinco puertas. Comprimiéndolo un poco más, se convertiría en un coche deportivo. Esto es mucho mejor que modelar arcilla, que es un material sin memoria ni inteligencia. La materia programable posee inteligencia, puede recordar formas anteriores, adaptarse a ideas nuevas y responder a los deseos de los diseñadores. Una vez que el modelo está terminado, el diseño se puede enviar por correo electrónico a miles de diseñadores, que así pueden crear copias exactas.

Esto podría tener un efecto tremendo en los productos de consumo. Los juguetes, por ejemplo, pueden programarse para cambiar su forma, insertando nuevas instrucciones con un programa informático. Así, en Navidad, bastaría con descargar el programa informático de un nuevo juguete, reprogramar el viejo, y aparecería un juguete totalmente diferente. En vez de abrir los regalos bajo el árbol, los niños podrían celebrar la Navidad descargando el programa informático que Santa Claus les ha enviado por correo electrónico para que tengan su juguete favorito. Los cátomos que componen el juguete del año pasado se convierten así en lo más nuevo y demandado del mercado. Esto significa que una amplia gama de productos comerciales puede reducirse a un surtido de programas informáticos enviados a través de internet. En vez de contratar un camión para que nos traiga el mobiliario y los electrodomésticos nuevos, podemos simplemente descargar de internet los correspondientes programas informáticos y reciclar nuestros viejos trastos. Gracias a la materia programable, la renovación de las casas dejará de ser una tarea penosa. En la cocina, la renovación de baldosas y azulejos, encimeras, aparatos y armarios se haría sencillamente pulsando un botón.

Además, esto reduciría el problema de la eliminación de desechos. Muchas de las cosas que ya no queremos no tendríamos que tirarlas si podemos reprogramarlas. Si un aparato o un mueble se rompe, solo tendremos que reprogramarlo, y volverá a ser nuevo.

Aunque esto es tremendamente prometedor, el equipo de Intel se enfrenta a numerosos problemas. Uno de ellos es cómo orquestar los movimientos de todos esos millones de cátomos. Habrá problemas de ancho de banda cuando intentemos que toda esa información se descargue en la materia programable. Pero también es posible tomar algunos atajos.

Por ejemplo, en las películas de ciencia ficción es corriente ver «mutantes», es decir, seres humanos que, de repente, se convierten en monstruos. Conseguir esto en una película solía ser un proceso muy complejo y tedioso, pero ahora se puede hacer fácilmente por ordenador. Primero hay que identificar ciertos vectores que marcan distintos puntos clave del rostro, como la nariz y los ojos, tanto en el ser humano como en el monstruo. Cada vez que se mueve un vector, el rostro va cambiando gradualmente. Los ordenadores están programados para mover esos vectores de un rostro al siguiente, cambiando así lentamente una cara por otra. Del mismo modo, tendría que ser posible utilizar atajos para cambiar la forma de cualquier objeto tridimensional.

Otro problema es que las fuerzas electrostáticas que actúan entre los átomos son débiles comparadas con las intensas fuerzas interatómicas que mantienen de una pieza a la mayoría de los sólidos. Como ya hemos visto, las fuerzas cuánticas pueden ser muy poderosas, ya que son responsables de las propiedades de dureza y resistencia de los metales y de las propiedades de elasticidad de los plásticos. En el futuro, un tema interesante será duplicar esas fuerzas cuánticas con fuerzas electrostáticas para garantizar que los productos sean estables.

Tuve ocasión de ser testigo directo de los notables y rápidos avances que se están logrando en materia programable cuando fui con un equipo de filmación de Science Channel a visitar a Seth Goldstein en la Universidad Carnegie Mellon. En su laboratorio podían verse grandes pilas de cubos de distintos tamaños diseminadas por toda la superficie de una mesa. Cada uno de esos cubos contenía varios chips. Vi dos de esos cubos unidos firmemente por fuerzas eléctricas, y Goldstein me pidió que intentara separarlos con las manos. Me sorprendí al ver que no podía hacerlo. Descubrí que las fuerzas eléctricas que unían los cubos eran muy poderosas. Después Goldstein señaló que las fuerzas eléctricas serían cada vez mayores si se miniaturizaban los cubos. Me llevó a otro laboratorio, donde me mostró lo pequeños que podían llegar a ser aquellos cátomos. Con las mismas técnicas que se usan para grabar millones de transistores en obleas de silicio, él podía grabar cátomos microscópicos de tan solo unos milímetros de diámetro. De hecho, eran tan pequeños que tuve que mirarlos con un microscopio para verlos claramente. La intención de Goldstein es conseguir, mediante el control de sus fuerzas eléctricas, que esos cátomos se dispongan adoptando cualquier forma solo con pulsar un botón, casi como un brujo que logra mediante conjuros todo lo que desea.

Luego le pregunté cómo podría dar instrucciones detalladas a miles y miles de millones de cátomos, para que, por ejemplo, un refrigerador se transformara de

repente en un horno. Le dije que todo eso me parecía la pesadilla de un programador. Pero Goldstein me contestó que no era preciso dar instrucciones detalladas a todos y cada uno de los cátomos. Lo único que necesita saber cada cátomo es a qué vecinos debe unirse. Si cada cátomo tiene instrucciones para unirse solo con un pequeño conjunto de cátomos vecinos, todos los cátomos se reordenarán por sí mismos como por arte de magia, formando estructuras complejas (algo muy parecido al hecho de que, cuando el cerebro de un bebé se desarrolla, sus neuronas solo necesitan saber cómo han de unirse a las neuronas vecinas).

Suponiendo que puedan resolverse los problemas de programación y estabilidad, existe la posibilidad de que a finales de siglo todos los edificios de una ciudad puedan levantarse solo con pulsar un botón. Lo único que se necesitaría sería fijar las ubicaciones de los edificios, cavar los cimientos y dejar que billones de cátomos crearan ciudades enteras que surgirían por sí solas en medio de desiertos o bosques.

Ahora bien, los ingenieros de Intel prevén ya el día en que los cátomos puedan incluso tomar forma humana. «¿Por qué no? El tema es interesante para hacer especulaciones», dice Rattner[16]. (Quizá entonces pueda hacerse realidad el robot T1000).

EL FUTURO LEJANO
(DESDE 2070 HASTA 2100)

EL SANTO GRIAL: EL *REPLICATOR*

Los defensores de la nanotecnología prevén para 2100 una máquina aún más poderosa: un ensamblador molecular, o *replicator*, capaz de crear cualquier cosa. Este aparato sería quizá del tamaño de una lavadora. Pondríamos la materia prima básica dentro de la máquina y luego pulsaríamos un botón. Entonces billones y billones de nanorrobots convergerían sobre la materia prima, cada uno de ellos programado para separar las moléculas de una en una y luego reunirlas en un producto totalmente distinto. Esta máquina podría fabricar cualquier cosa. El replicante sería el logro supremo de la ingeniería y la técnica, la culminación definitiva de todas nuestras luchas desde que agarramos la primera herramienta durante la prehistoria.

Un problema que plantea el replicante es el número total de átomos que deben ser reorganizados para copiar cualquier objeto. El cuerpo humano, por ejemplo, tiene unos 50 billones de células y más de 10^{26} átomos. Es un número increíble que requiere una cantidad colosal de memoria solo para almacenar las posiciones de todos esos átomos.

Ahora bien, un modo de superar esta dificultad es crear un nanobot, es decir, un robot molecular, que de momento es hipotético. Estos nanobots poseen varias

propiedades cruciales. Primero, pueden autorreproducirse. Si consiguen reproducirse una vez, pueden, en principio, crear luego un número ilimitado de copias de sí mismos. Por lo tanto, la cuestión es crear el primer nanobot. En segundo lugar, son capaces de identificar moléculas y cortarlas por los puntos precisos. En tercer lugar, siguiendo un código maestro, pueden reensamblar estos átomos, organizándolos de maneras diferentes. Así, la tarea de reorganizar 10^{26} átomos se reduce a hacer un número similar de nanobots, cada uno de ellos diseñado para manipular átomos individuales. De esta manera, el número total de átomos que hay en el cuerpo deja de ser un obstáculo desalentador. El auténtico problema es crear el primero de esos míticos nanobots y hacer que luego se reproduzca por sí mismo.

No obstante, la comunidad científica está dividida con respecto a la cuestión de si el increíble sueño de crear una nanofábrica es físicamente posible. Unos pocos, entre los que se encuentra Eric Drexler, pionero de la nanotecnología y autor de *La nanotecnología: el surgimiento de las máquinas de creación*, prevé un futuro en el que todos los productos se manufacturarán a nivel molecular, creando un cuerno de la abundancia con el que por ahora solo podemos soñar. La sociedad experimentará un cambio radical en todos los aspectos, cuando se consiga una máquina que puede crear cualquier cosa que deseemos. Otros científicos, sin embargo, son escépticos.

El difunto premio Nobel Richard Smalley, por ejemplo, planteó el problema de los «dedos pegajosos» y los «dedos gruesos» en un artículo publicado en *Scientific American* en 2001. La pregunta crucial es: ¿Puede construirse un nanobot que sea suficientemente hábil para reorganizar moléculas a voluntad? Él decía que la respuesta era «no».

Este debate estalló cuando Smalley expresó sus discrepancias con Drexler en una serie de cartas que se publicaron en las páginas de *Chemical and Engineering News* entre 2003 y 2004. Las repercusiones de aquel debate todavía hoy pueden sentirse. La posición de Smalley era la de que los «dedos» de una máquina molecular no serían capaces de realizar esta delicada tarea por dos razones.

En primer lugar, los «dedos» se encontrarían con unas pequeñas fuerzas de atracción que les harían quedarse pegados a otras moléculas. Los átomos se pegan unos a otros, en parte, a causa de pequeñas fuerzas eléctricas, como la fuerza de Van der Waals que existe entre sus electrones. Pensemos en lo que sería intentar reparar un reloj con unas pinzas cubiertas de miel. Sería imposible ensamblar algo tan delicado como las piezas de un reloj. Ahora imaginemos que vamos a ensamblar algo aún más complicado que un reloj, como una molécula, que se nos pega constantemente a los dedos.

En segundo lugar, esos dedos pueden ser demasiado «gruesos» para manipular átomos. Pensemos que para reparar el reloj nos ponemos unos gruesos guantes de algodón. Puesto que los «dedos» están hechos de átomos, al igual que los objetos que han de manipular, puede que esos dedos sean demasiado gruesos para realizar las delicadas operaciones requeridas.

Smalley concluyó diciendo: «Del mismo modo que no podemos hacer que un chico y una chica se enamoren por el simple método de empujarlos a estar juntos, tampoco podemos hacer que tenga lugar una reacción química precisa entre dos moléculas aplicándoles un simple movimiento mecánico… La química, como el amor, es más sutil que todo eso[17]».

Este debate profundiza la cuestión de si un replicante llegará algún día a revolucionar la sociedad o será visto como una curiosidad y acabará en el cubo de la basura de la tecnología. Como ya hemos visto, las leyes de la física que rigen nuestro mundo no se trasladan fácilmente al mundo de los nanobjetos. Determinados efectos que nosotros podemos ignorar, como las fuerzas de Van der Waals, la tensión superficial, el principio de incertidumbre, el principio de exclusión de Pauli, etcétera, son dominantes en el nanomundo.

Para valorar de manera adecuada este problema, imaginemos que el átomo es del tamaño de una canica y que tenemos una piscina llena de átomos como ese. Caer en esa piscina sería muy diferente de caer en una piscina normal llena de agua. Las «canicas» estarían vibrando constantemente y golpeándonos desde todas las direcciones a causa del movimiento browniano. Nadar en esa piscina sería casi imposible, porque sería como intentar nadar en melaza. Cada vez que intentáramos agarrar una de esas canicas, o bien se nos escaparía, o se nos pegaría a los dedos a causa de una compleja combinación de fuerzas.

Al final, ambos científicos estuvieron de acuerdo en que no estaban de acuerdo. Aunque Smalley fue incapaz de asestar el golpe definitivo a la teoría del replicante molecular, varias cosas quedaron claras una vez que amainó la tempestad. En primer lugar, ambos estuvieron de acuerdo en que la ingenua idea del nanobot armado con pinzas moleculares que cortaba y ensamblaba moléculas tenía que ser modificada. Las nuevas fuerzas cuánticas son dominantes a escala atómica.

En segundo lugar, aunque este replicante, o fabricante universal, es hoy por hoy ciencia ficción, existe ya una versión de este agente. La madre naturaleza, por ejemplo, puede coger hamburguesas y verduras, y convertirlas en un bebé en nueve meses. Este proceso lo llevan a cabo unas moléculas de ADN (donde está codificado el diseño del niño), que guían las acciones de los ribosomas (que cortan y empalman las moléculas en el orden correcto), utilizando las proteínas y los aminoácidos presentes en los alimentos.

Y en tercer lugar, un ensamblador molecular podría funcionar, pero en una versión más sofisticada. Por ejemplo, tal como indicó Smalley, el hecho de juntar dos átomos no garantiza una reacción química. La madre naturaleza suele soslayar este problema utilizando un tercer agente, una enzima en una solución acuosa, para facilitar la reacción química. Smalley señaló que muchas sustancias químicas que se encuentran en los ordenadores y en la industria electrónica no pueden ser disueltas en agua. Pero Drexler replicó diciendo que no todas las reacciones químicas requieren la presencia de agua o enzimas.

Una posibilidad, por ejemplo, se llama autoensamblaje o planteamiento de abajo hacia arriba. Desde la antigüedad, los seres humanos han utilizado el llamado planteamiento de arriba hacia abajo para la construcción. Con herramientas tales como un martillo y una sierra, se empieza por cortar madera y luego unir piezas en un tablero para crear estructuras mayores, como una casa según unos planos. Hay que dirigir cuidadosamente este proceso desde arriba y en cada paso del camino.

En el planteamiento de abajo hacia arriba, los objetos se ensamblan por sí solos. En la naturaleza, por ejemplo, los bellos copos de nieve cristalizan todos por sí mismos en una tormenta. Billones y billones de átomos se reorganizan para crear nuevas formas. No hace falta que ninguno diseñe cada copo de nieve. Esto también ocurre a menudo en los sistemas biológicos. Los ribosomas bacterianos, unos sistemas moleculares complejos que contienen al menos cincuenta y cinco moléculas de proteínas diferentes y varias moléculas de ARN, pueden autoensamblarse de manera espontánea en un tubo de ensayo.

El autoensamblaje se utiliza también en la industria de los semiconductores. A veces los componentes que se usan en los transistores se ensamblan por sí mismos. Aplicando en una secuencia precisa varias técnicas y procesos de gran complejidad (tales como *quenching*, cristalización, polimerización, deposición de vapor, solidificación, etc.) se puede producir toda una diversidad de componentes de ordenador que son válidos comercialmente. Como hemos visto con anterioridad, cierto tipo de nanopartícula utilizada contra las células cancerosas se puede producir mediante este método.

Sin embargo, la mayoría de las cosas no se crean por sí mismas. Se ha comprobado que, en general, solo una pequeñísima fracción de los nanomateriales se autoensamblan adecuadamente. No se puede ordenar a una nanomáquina que utilice el autoensamblaje como si fuera solo cuestión de ordenarlo desde un menú. Los avances en este modo de creación de nanomáquinas serán continuos pero lentos.

Resumiendo, los ensambladores moleculares no violan aparentemente ninguna ley de la física, pero serán demasiado difíciles de fabricar. Los nanobots no existen por ahora, y no existirán en un futuro cercano, pero una vez que se produzca el primer nanobot (si es que se produce), la sociedad, tal como la conocemos actualmente, podría cambiar en gran medida.

LA CONSTRUCCIÓN DE UN REPLICANTE

¿Qué aspecto podría tener un replicante? Nadie lo sabe con exactitud, ya que estamos a décadas, o quizá a un siglo, de construir uno realmente, pero me hice una idea de cómo sería cuando me examinaron la cabeza (en sentido literal). Para un especial de Science Channel se hizo una copia tridimensional y realista de mi rostro en plástico, escaneando con un rayo láser horizontalmente mi cara. Cuando el rayo incidió en mi

piel, la reflexión del mismo se grabó mediante un sensor que enviaba la imagen a un ordenador. Luego el rayo hizo la pasada siguiente por mi cara, pero un poco más abajo. Finalmente escaneó todo mi rostro, dividiéndolo en muchas rodajas horizontales. Mirando en una pantalla de ordenador, se puede ver cómo emerge una imagen tridimensional de la superficie de mi rostro, con una precisión de quizá una décima de milímetro y formada por esas rodajas horizontales.

Después se introdujo la información en un gran aparato, más o menos del tamaño de un refrigerador, que puede crear una imagen tridimensional en plástico de casi todo. Este aparato tiene una pequeña boquilla que se mueve horizontalmente, haciendo muchas pasadas. En cada una de estas pulveriza una pequeña cantidad de plástico derretido, haciendo así un duplicado de la imagen original de mi rostro que el láser había copiado. Después de unos diez minutos y numerosas pasadas, el modelo emergió de esta máquina, y tenía un extraño parecido con mi cara.

Las aplicaciones comerciales de esta tecnología son enormes, ya que en unos pocos minutos se puede crear una copia realista de cualquier objeto tridimensional, como, por ejemplo, piezas de maquinaria complicadas. Sin embargo, nos podemos imaginar un aparato que, dentro de décadas o siglos, sea capaz de crear una copia tridimensional de cualquier objeto real a niveles celulares y atómicos.

En el nivel siguiente, es posible utilizar este escáner tridimensional para crear órganos vivos del cuerpo humano. En la Universidad de Wake Forest, unos científicos han sido pioneros en la creación de tejido cardíaco vivo con una impresora de inyección de tinta. Primero han escrito con todo detalle un programa informático que, de manera sucesiva, lanza, como un vaporizador, células cardíacas vivas cada vez que el inyector hace una pasada. Para esto utiliza una impresora corriente de inyección de tinta, cuyo cartucho está lleno de una mezcla de fluidos que contienen células cardíacas vivas. De este modo controlan el emplazamiento tridimensional exacto de cada célula. Después de múltiples pasadas, consiguen crear realmente las capas de tejido cardíaco.

Hay otro instrumento que algún día podría registrar la ubicación de cada átomo de nuestro cuerpo: el escáner de IRM. Como se ha señalado anteriormente, la precisión del escaneado por IRM viene a ser de una décima de milímetro. Esto significa que cualquier píxel de un escaneado por IRM puede contener miles de células. Ahora bien, si examinamos la física que hay detrás de la IRM, vemos que la precisión de la imagen está relacionada con la uniformidad del campo magnético que actúa en el interior del aparato. Por lo tanto, haciendo que el campo magnético sea cada vez más uniforme, se puede ir incluso a una precisión inferior a la décima de milímetro.

Los científicos ya prevén un aparato del tipo del de IRM con una resolución que llega hasta el tamaño de una célula, e incluso más allá, pudiéndose escanear hasta moléculas y átomos individuales.

En resumen, un replicante no viola las leyes de la física, pero sería difícil de crear utilizando el autoensamblaje. A finales de este siglo, cuando se controlen por fin las

técnicas de autoensamblaje, podremos pensar en las aplicaciones comerciales de los replicantes.

¿LA PLAGA GRIS?

Algunas personas, entre las que se encuentra Bill Joy, fundador de Sun Microsystems, han expresado sus reservas con respecto a la nanotecnología, diciendo por escrito que es solo cuestión de tiempo que esta tecnología se desboque, devore todos los minerales de la Tierra y deje en su lugar como residuo una «plaga gris» inservible. Incluso el príncipe Carlos de Inglaterra se ha pronunciado en contra de la nanotecnología y el terrible panorama de la plaga gris.

El peligro reside en la propiedad crucial de esos nanobots: pueden reproducirse por sí mismos. Al igual que los virus, no pueden ser recuperados una vez que se dejan libres en el entorno. Con el tiempo podrían proliferar de manera salvaje, invadiendo el medio ambiente y destruyendo el planeta.

Mi opinión personal es que pasarán muchas décadas, incluso siglos, antes de que esta tecnología esté suficientemente madura para crear replicantes, por lo que la preocupación por la plaga gris es prematura. Mientras pasan esas décadas, habrá mucho tiempo para diseñar defensas contra los nanobots que puedan volverse agresivos y destructores. Por ejemplo, se podrá diseñar un sistema a prueba de fallos de modo que, presionando el botón de alarma, todos los nanobots queden inutilizados. O se podría crear «robots asesinos», específicamente diseñados para buscar y destruir los nanobots que hayan quedado fuera de control.

Otro modo de abordar el problema consiste en estudiar la madre naturaleza, que tiene miles de millones de años de experiencia en esta cuestión. Nuestro mundo está lleno de formas de vida moleculares que se autorreproducen: se llaman virus y bacterias, pueden proliferar sin control y también mutar. Sin embargo, nuestro cuerpo ha creado asimismo sus propios «nanobots»: anticuerpos y glóbulos blancos que forman parte de nuestro sistema inmunológico, y buscan y destruyen formas de vida extrañas. Este sistema desde luego no es perfecto, pero constituye un ejemplo de cómo podríamos tratar el problema de los nanobots descontrolados.

IMPACTO SOCIAL DE LOS REPLICANTES

En un programa especial que presenté en BBC/Discovery Channel, Joel Garreau, autor de *Radical Evolution*, dijo: «Si alguna vez llega a ser posible la existencia de un autoensamblador, ese será uno de los momentos más alucinantes de la historia, porque estamos hablando de transformar el mundo en algo nunca visto con anterioridad**[18]**».

Hay un viejo dicho que reza: «Ten cuidado con lo que deseas, porque igual se hace realidad». El Santo Grial de la nanotecnología es crear el ensamblador molecular, o replicante, pero, una vez que esté inventado, podría alterar los cimientos de la propia sociedad. Todas las filosofías y todos los sistemas sociales se basan en última instancia en la escasez y la pobreza. A lo largo de la historia del género humano, este ha sido el tema dominante que ha preocupado a la sociedad, configurando nuestra cultura, nuestra filosofía y nuestra religión. En algunas religiones se considera la prosperidad como una recompensa divina y la pobreza, como un castigo. Por el contrario, el budismo se basa en la naturaleza universal del sufrimiento y en el modo de enfrentarse a él. En el cristianismo, el Nuevo Testamento dice: «Es más fácil que un camello pase a través del ojo de una aguja que para un rico entrar en el reino de los cielos».

La distribución de la riqueza define también a la propia sociedad. El feudalismo se basaba en preservar la riqueza de un reducido número de aristócratas frente a la pobreza de los campesinos. El capitalismo se fundamenta en la idea de que las personas enérgicas y productivas obtienen la recompensa por sus esfuerzos cuando fundan empresas y se hacen ricas. Pero, si los individuos perezosos e improductivos pudieran conseguir todo lo que desean pulsando un botón, el capitalismo deja de funcionar. Un replicante desbarata todos los planes, transformando de arriba abajo las relaciones humanas. Las diferencias entre los que tienen mucho y los que no tienen nada pueden desaparecer, y con ellas las nociones de posición social y poder político.

Este enigma fue explorado en la película *Star Trek: la próxima generación*, en la que se encuentra una cápsula del siglo XX flotando en el espacio exterior. Dentro de la cápsula se encuentran los cuerpos de personas que sufrieron enfermedades que eran incurables en aquellos tiempos primitivos, y fueron congeladas con la esperanza de poder revivir en el futuro. Los médicos de la nave espacial *Enterprise* curan rápidamente a esos individuos de sus enfermedades y les hacen revivir. Esas personas afortunadas se sorprenden al ver que su aventura ha valido la pena, pero una de ellas es un astuto capitalista. Lo primero que pregunta es: «¿En qué siglo estamos?». Al saber que ha vuelto a la vida en el siglo XXIV, se da cuenta rápidamente de que sus inversiones, después de tanto tiempo, han de valer una fortuna. Pide de inmediato ponerse en contacto con su banquero en la Tierra, pero la tripulación del *Enterprise* está desconcertada. ¿Dinero? ¿Inversiones? Eso no existe en el futuro. En el siglo XXIV basta con pedir una cosa para que nos la den al momento.

Esto pone también en cuestión la búsqueda de una sociedad perfecta, o utopía, una palabra acuñada por sir Thomas More en su novela *Utopía*, escrita en 1516. Abrumado por el sufrimiento y la miseria que vio a su alrededor, imaginó un paraíso en una isla ficticia situada en el océano Atlántico. En el siglo XIX había en Europa muchos movimientos sociales que buscaban diversas formas de utopía, y un gran número de ellos encontró refugio tras huir a Estados Unidos, donde todavía hoy vemos vestigios de sus asentamientos.

Por una parte, un replicante podría proporcionarnos la utopía que previeron los visionarios del siglo XIX. Los experimentos utópicos anteriores fracasaron a causa de la escasez, la cual conduce a las desigualdades, las peleas y el desastre. Pero, si los replicantes resuelven el problema de la escasez, quizá se pueda alcanzar la utopía. Las artes plásticas, la música y la poesía florecerán, y la gente tendrá libertad para explorar sus sueños y deseos más profundos.

Por otra parte, sin el impulso motivador de la escasez y el dinero, se podría llegar a una sociedad caprichosa y degenerada que se hundiera en lo más bajo. Solo unos pocos, los más motivados artísticamente, se esforzarían por escribir poesía. El resto de nosotros, según afirman las voces críticas, nos convertiríamos en unos holgazanes y gandules.

Incluso las definiciones que utilizan los utópicos se pondrían en cuestión. El mantra del socialismo, por ejemplo, es: «De cada uno según su capacidad; a cada uno según su contribución». El del comunismo, el nivel más elevado de socialismo, es: «De cada uno según su capacidad; a cada uno según su necesidad».

Pero, si los replicantes son posibles, el mantra se convierte simplemente en: «A cada uno según sus deseos».

Sin embargo, hay un tercer modo de ver esta cuestión. Según el Principio del Hombre de las Cavernas, el carácter de la gente no ha cambiado mucho en lo fundamental durante los últimos 100.000 años. Cuando los seres humanos vivían en las cavernas, no existía lo que ahora llamamos un empleo. Los antropólogos dicen que las sociedades primitivas eran en gran medida comunales, en el sentido de que compartían equitativamente los bienes y las penurias. El ritmo cotidiano no estaba gobernado por un empleo y un salario, ya que no existía ni lo uno ni lo otro.

Y, sin embargo, los individuos de aquella época no se convertían en holgazanes, por diversas razones. Primero, porque se habrían muerto de hambre. Al que no compartía el trabajo, simplemente lo echaban de la tribu, y el marginado no tardaba en perecer. En segundo lugar, la gente estaba orgullosa de su trabajo e incluso le encontraba un sentido a la tarea. En tercer lugar, había una enorme presión social para seguir siendo un miembro productivo de la sociedad. Los individuos productivos eran los que conseguían casarse para pasar sus genes a la generación siguiente, mientras que los genes de los holgazanes solían morir con ellos.

Entonces, ¿por qué vivirá la gente una vida productiva cuando los replicantes hayan sido inventados y todo el mundo pueda tener lo que desea? Ante todo, los replicantes garantizarían que nadie muriera de hambre. Pero, además, es probable que la mayoría de la gente siguiera trabajando porque estarían orgullosos de sus habilidades y le encontrarían un sentido a su tarea. Sin embargo, la tercera razón, es decir, la presión social, es difícil de mantener sin violar la libertad personal. En vez de la presión social, tendría que producirse probablemente un cambio importante en la educación para cambiar la actitud de la gente ante el trabajo y su retribución, con el fin de no abusar del replicante.

Afortunadamente, como el progreso será lento, y falta más o menos un siglo para que llegue el replicante, la sociedad tendrá mucho tiempo para debatir los méritos e implicaciones de esta tecnología y adaptarse a la nueva realidad para que la sociedad no se desintegre.

Es más que probable que los primeros replicantes sean caros. Como dice Rodney Brooks, un experto en robótica del MIT: «La nanotecnología se desarrollará en gran medida como lo hace la fotolitografía: en situaciones controladas y de gran coste económico, y no como una tecnología independiente y de consumo masivo dentro del mercado[19]». No existirá el problema de que sea una mercancía libre e ilimitada. Dada la sofisticación de estos aparatos, es posible que pasen muchas décadas desde que se creen los primeros hasta que se abaraten los costes.

En una ocasión tuve una conversación muy interesante con Jamais Cascio, un futurista de primer orden con una larga carrera de atenta contemplación de los perfiles del futuro. Primero, me dijo que ponía en duda la teoría de la singularidad que se ha mencionado en el capítulo 2, porque la naturaleza humana y la dinámica social son mucho más confusas, complejas e impredecibles para encajar en una teoría clara y sencilla. Pero también admitió que unos notables avances en nanotecnología podrían crear al cabo del tiempo una sociedad en la que hubiera sobreabundancia de bienes, especialmente con replicantes y robots. Entonces le pregunté: «¿Cómo se comportará la sociedad cuando las mercancías sean prácticamente gratuitas, cuando esa sociedad sea por fin tan rica que nadie necesite trabajar?».

Me dijo que podían suceder dos cosas. Primero, pensaba que habría riqueza suficiente para garantizar unos ingresos mínimos decentes para todas las personas, aunque estas no trabajaran. Probablemente habría una parte de la población que se convertiría en holgazana para siempre. Cascio preveía una red de seguridad permanente para la sociedad. Esto no sería deseable, pero sí inevitable, especialmente si los replicantes y los robots satisfacían todas nuestras necesidades materiales. En segundo lugar, pensaba que esto se compensaría desencadenando una revolución en el espíritu empresarial. Libres del miedo a arruinarse y caer en la pobreza, los individuos más trabajadores tendrían más iniciativa y asumirían el riesgo adicional de crear nuevas industrias y dar nuevas oportunidades a los demás. Cascio pronosticaba un nuevo renacer de la sociedad, cuando el espíritu creativo se viera libre del temor a la bancarrota.

Dentro de mi propio campo, la física, veo que la mayoría de nosotros elegimos esta profesión no por el dinero, sino por el mero placer de descubrir e innovar. A menudo rechazamos lucrativos empleos en otros campos porque queremos alcanzar un sueño, no los dólares. Los artistas e intelectuales que conozco piensan igual: su objetivo no es amasar la mayor cantidad de dinero posible en una cuenta bancaria, sino ser creativos y ennoblecer el espíritu humano.

Si en 2100 la sociedad llega a ser tan rica que vivamos rodeados de bienestar material, personalmente creo que la sociedad reaccionará de una manera similar. Una

parte de la población constituirá una clase inamovible de personas que simplemente rechazarán el trabajo. Otros se verán liberados de la coacción que ejerce la pobreza, y perseguirán logros creativos, tanto científicos como artísticos. Para estos, la mera alegría de ser creativos, innovadores y artistas valdrá más que los alicientes de un mundo materialista. Sin embargo, la mayoría seguirán trabajando y siendo útiles a la sociedad simplemente porque eso es parte de su herencia genética, es decir, el Principio del Hombre de las Cavernas que todos llevamos dentro.

Ahora bien, hay un problema que ni siquiera los replicantes podrán resolver. Se trata del problema de la energía. Todas estas tecnologías milagrosas necesitan enormes cantidades de energía para mantenerse activas. ¿De dónde se obtendrá toda esa energía?

5
EL FUTURO DE LA ENERGÍA
La energía de las estrellas



La edad de piedra no se acabó por falta de piedra. Del mismo modo, la era del petróleo acabará mucho antes de que el planeta se quede sin petróleo.

JAMES CANTON

En mi mente [la fusión] está al mismo nivel que el regalo original del fuego, en las brumas de la prehistoria.

BEN BOVA

LAS ESTRELLAS fueron la fuente de energía de los dioses. Cuando Apolo recorrió el cielo en un carro tirado por caballos que expulsaban fuego por la boca, iluminó los cielos y la tierra con la energía infinita del sol. Su poder no tenía otro rival que el propio Zeus. En una ocasión, cuando Sémele, una de las numerosas amantes mortales de Zeus, pidió verlo en su forma verdadera, el dios accedió a regañadientes. La consiguiente explosión de cegadora energía cósmica abrasó a Sémele.

Los seres humanos de este siglo queremos aprovechar el poder de las estrellas, que fueron la fuente de energía de los dioses. A corto plazo, esto significa entrar en una era de energía solar o derivada del hidrógeno, con el fin de sustituir los combustibles fósiles. Pero a largo plazo implica aprovechar la energía de la fusión, e incluso la energía solar procedente del espacio exterior. Posteriores avances en la física podrían desembocar en la era del magnetismo, en la que los coches, los trenes e incluso los monopatines flotarían por el aire sobre un colchón de magnetismo. Nuestro consumo energético podría reducirse de una manera drástica, ya que casi toda la energía que se utiliza en los coches y los trenes tiene la finalidad de contrarrestar la fricción de la carretera o de los raíles.

¿EL FINAL DEL PETRÓLEO?

Hoy en día nuestro planeta está completamente ligado a los combustibles fósiles, ya sea en forma de petróleo, gas natural, o carbón. Nuestro planeta consume un total de

energía de unos 14 billones de vatios[1], de los cuales un 33 por ciento proceden del petróleo, un 25 por ciento del carbón, un 20 por ciento del gas, un 7 por ciento de la energía nuclear, un 15 por ciento de la biomasa y de la energía hidroeléctrica, y un modesto 5 por ciento de la energía solar y las energías renovables.

Sin los combustibles fósiles, la economía mundial sufriría un parón.

Quien vio claramente el final de la era del petróleo fue M. King Hubbert, un ingeniero del petróleo que trabajaba en la Shell Oil. En 1956, Hubbert pronunció en el Instituto Norteamericano del Petróleo una conferencia trascendental en la que realizaba una alarmante predicción que suscitó la burla de la mayoría de sus colegas de la época. Predijo que las reservas petroleras de Estados Unidos se estaban reduciendo tan rápidamente que pronto se habría extraído el 50 por ciento del petróleo existente en el subsuelo[2], lo cual daría lugar a un período de decadencia irreversible que se situaría entre 1965 y 1971. Observaba que la cantidad total de petróleo que había en Estados Unidos se podría representar en un gráfico como una curva en forma de campana, y que nos encontrábamos cerca del máximo de dicha curva. Predijo que a partir de aquel momento las cosas solo podían ir hacia abajo. Esto significaba que el petróleo sería cada vez más difícil de extraer, por lo que sucedería lo inevitable: Estados Unidos importaría petróleo.

Su predicción parecía temeraria, incluso extravagante e irresponsable, ya que entonces Estados Unidos todavía bombeaba una enorme cantidad de petróleo de Texas y otros lugares del país. Pero ahora los ingenieros del petróleo ya no se ríen. La predicción de Hubbert era básicamente correcta. En 1970, la producción petrolera estadounidense alcanzó un máximo de 10,2 millones de barriles diarios y posteriormente sufrió una caída de la que nunca se ha recuperado. Hoy en día, Estados Unidos importa el 59 por ciento de su petróleo. De hecho, si comparamos un gráfico de las estimaciones de Hubbert, hecho hace varias décadas, con un gráfico de la producción real de petróleo en Estados Unidos durante el año 2005, ambas curvas son casi idénticas.

Ahora la cuestión fundamental a la que se enfrentan los ingenieros del petróleo es la siguiente: ¿Estamos en el máximo del gráfico de Hubbert por lo que respecta a las reservas mundiales de petróleo? Volviendo a 1956, Hubbert predijo también que la producción global de petróleo alcanzaría su pico máximo en unos cincuenta años. Podría ser que de nuevo tuviera razón. Cuando nuestros hijos miren retrospectivamente hacia nuestra época, ¿considerarán los combustibles fósiles del mismo modo que nosotros vemos ahora el aceite de ballena, es decir, como una desgraciada reliquia de un pasado lejano?

En muchas ocasiones he pronunciado conferencias en Arabia Saudí y Oriente Próximo, y en ellas he hablado sobre ciencia, energía y el futuro. Por una parte, Arabia Saudí tiene 267.000 millones de barriles de petróleo, por lo que parece que este país flota sobre un enorme lago subterráneo de crudo. Siempre que he viajado por Arabia Saudí y los estados del golfo Pérsico he podido ser testigo de un enorme

derroche de energía, con enormes fuentes que brotan en medio del desierto, creando gigantescos estanques artificiales y lagos. En Dubai existe incluso una pista de esquí cubierta en la que hay miles de toneladas de nieve artificial, desafiando totalmente el calor abrasador que hace en el exterior.

Pero ahora los ministros del Petróleo están preocupados. Más allá de toda la retórica de «reservas de petróleo verificadas», que supuestamente nos tranquilizan en cuanto a que tendremos mucho petróleo durante las décadas venideras, está la constatación de que muchas de esas cifras autorizadas son solo pura comedia. La expresión «reservas de petróleo verificadas» nos tranquiliza porque suena como algo definitivo y cargado de autoridad, hasta que nos damos cuenta de que esas reservas son a menudo una invención del pensamiento voluntarista y la presión política de un ministro local del Petróleo.

Hablando con los expertos en energía, pude ver que está surgiendo un consenso básico: o bien estamos en el pico más alto de la curva de Hubbert para la producción mundial de petróleo, o tal vez a una década de distancia de ese punto fatídico. Esto significa que en un futuro cercano podríamos entrar en un período de caída irreversible.

Por supuesto, nunca nos quedaremos sin una gota de petróleo. Continuamente se descubren nuevas bolsas. Pero los costes de la extracción y el refinado no dejarán de subir de manera vertiginosa. Por ejemplo, Canadá tiene enormes depósitos de arenas bituminosas, suficientes para satisfacer la demanda mundial de petróleo durante décadas, pero la extracción y el refinado no son rentables. Estados Unidos tiene unas reservas de carbón que probablemente serían suficientes para trescientos años, pero existen restricciones legales, y el coste de extraer todas las sustancias contaminantes, tanto en forma de partículas como gaseosas, resulta muy oneroso.

Además, el petróleo sigue encontrándose en regiones del mundo de gran volatilidad política, que contribuyen a la inestabilidad de la política exterior. Si se hace un gráfico de los precios del petróleo a lo largo de décadas, se observa que la curva es como un recorrido en la montaña rusa, con picos que llegan al asombroso precio de 140 dólares por barril en 2008 (y más de 4 dólares por galón en las gasolineras de Estados Unidos), para luego caer en picado a causa de la gran recesión. Aunque hay violentas oscilaciones debidas a la inestabilidad política, la especulación, los rumores, etcétera, una cosa está clara: el precio medio del petróleo seguirá subiendo a largo plazo.

Esto tendrá profundas consecuencias para la economía mundial. El rápido auge de la civilización moderna en el siglo XX ha sido impulsado por dos cosas: el petróleo barato y la ley de Moore. Si los precios de la energía suben, estos ejercerán una fuerte presión sobre el suministro mundial de alimentos y también sobre el control de la contaminación. Como ha dicho el novelista Jerry Pournelle: «Los alimentos y la contaminación no son problemas primarios, son problemas energéticos. Si disponemos de energía suficiente, podemos producir tanta cantidad de alimentos

como queramos, aplicando, si fuera necesario, técnicas de alta intensidad, como la agricultura hidropónica y el cultivo en invernaderos. Con la contaminación sucede algo parecido: si hay energía suficiente, los contaminantes pueden transformarse en productos manejables; si es necesario, pueden descomponerse en las distintas sustancias que los constituyen[3]».

Nos enfrentamos también a otra situación: el ascenso de una clase media en China y la India, lo cual constituye uno de los grandes cambios demográficos de la era posterior a la Segunda Guerra Mundial y ha generado una enorme presión sobre los precios del petróleo y de las mercancías en general. Como ven las hamburguesas de McDonald's y los garajes con dos coches en las películas de Hollywood, ellos también quieren vivir el sueño americano de consumo derrochador de energía.

EL FUTURO CERCANO (DESDE EL PRESENTE HASTA 2030)

ECONOMÍA BASADA EN EL HIDRÓGENO SOLAR

En este aspecto, la historia parece repetirse. Si nos remontamos a principios del siglo XX, Henry Ford y Thomas Edison, dos viejos amigos, hicieron una apuesta sobre cuál sería la forma de energía que alimentaría el futuro. Henry Ford apostó por los combustibles líquidos, que sustituirían al carbón, ya que el motor de combustión interna reemplazaría a las máquinas de vapor. Thomas Edison apostó por el coche eléctrico. Fue una apuesta profética, cuyo resultado tendría un profundo efecto en la historia del mundo. Durante un tiempo se pensó que Edison ganaría la apuesta, porque el aceite de ballena era extremadamente difícil de conseguir. Sin embargo, el rápido descubrimiento de depósitos de petróleo en Oriente Próximo y en otros lugares, y lo barato que resultaba este combustible, pronto hizo que Ford saliera victorioso. El mundo no ha vuelto a ser el mismo desde entonces. Las baterías no podían competir con el increíble éxito de la gasolina. (Incluso ahora, en igualdad de costes, la gasolina contiene aproximadamente cuarenta veces más energía que una batería).

Pero en la actualidad la tendencia está cambiando poco a poco. Quizá Edison gane todavía, un siglo después de realizar la apuesta.

La pregunta que se plantea en los ámbitos gubernamentales y de la industria es la siguiente: ¿Qué sustituirá al petróleo? No hay una respuesta clara. A corto plazo no hay nada que pueda sustituir inmediatamente a los combustibles fósiles, y lo más probable es que se apueste por una energía mixta, sin que una forma de energía domine a las otras.

Pero la posibilidad más prometedora para suceder al petróleo es la energía generada a partir del hidrógeno (basada en tecnologías renovables, como las energías solar, eólica, hidroeléctrica y en el hidrógeno).

En el momento actual, el coste de la electricidad producida mediante células solares es varias veces el precio de la que se produce a partir del carbón. Pero el coste del hidrógeno solar no deja de bajar a causa de los continuos avances tecnológicos, mientras que el de los combustibles fósiles sigue subiendo lentamente. Se calcula que entre diez y quince años, más o menos, las dos curvas se cruzarán. Entonces las fuerzas del mercado harán el resto.

ENERGÍA EÓLICA

A corto plazo, las energías renovables como la eólica llevan las de ganar. La capacidad generadora del viento creció en todo el mundo de 17.000 megavatios en 2000 a 121.000 megavatios en 2008. La energía eólica, que en otros tiempos estaba considerada de poca importancia, se está haciendo cada vez más prominente. Los recientes avances en la tecnología de la turbina eólica han aumentado la eficiencia y la productividad de los parques eólicos, que constituyen uno de los sectores de más rápido crecimiento en el mercado de la energía.

Los actuales parques eólicos distan mucho del viejo molino de viento que daba energía a las granjas y las fábricas a finales del siglo XIX. Un solo aerogenerador no contaminante y seguro puede producir una potencia de 5 megavatios, lo cual es suficiente para abastecer a un pueblo pequeño. Una turbina eólica tiene unas aspas enormes y lustrosas de unos 30 metros de longitud que giran con una fricción casi nula. Las turbinas eólicas generan electricidad del mismo modo que las presas hidroeléctricas y los generadores de bicicleta. El movimiento rotatorio hace girar un imán que se encuentra dentro de una bobina. El campo magnético producido genera un flujo de electrones en la bobina, creando una corriente eléctrica neta. Un gran parque eólico de 100 molinos puede producir 500 megavatios, lo cual es comparable con los 1.000 megavatios que producen una central termoeléctrica o una central nuclear.

Durante las últimas décadas, Europa ha sido líder mundial en tecnología eólica. Sin embargo, recientemente Estados Unidos ha superado a Europa en la producción de electricidad generada por el viento. En 2009, Estados Unidos produjo 28.000 megavatios a partir de la energía eólica. Pero solo en Texas se producen 8.000 megavatios, y este estado tiene otros 1.000 megavatios en construcción, y aún más en proyecto. Si todo va según los planes establecidos, Texas generará 50.000 megavatios mediante la energía eólica, más que suficiente para abastecer a este estado de 24 millones de habitantes.

China pronto superará a Estados Unidos en energía eólica[4]. Su programa basado en el aprovechamiento del viento creará seis parques eólicos que tendrán capacidad para generar 127.000 megavatios.

Aunque la energía eólica es cada vez más atractiva e indudablemente seguirá creciendo en el futuro, no puede aportar toda la energía que se consume en el planeta. En el mejor de los casos, será una parte integrante de un conglomerado energético mayor. La energía eólica se enfrenta a diversos problemas. Se genera solo de manera intermitente, cuando sopla el viento, y únicamente en unas pocas zonas concretas del mundo. Además, a causa de las pérdidas en la transmisión de electricidad, los parques eólicos han de estar cerca de las ciudades, lo cual limita aún más su utilidad.

AQUÍ LLEGA EL SOL

En última instancia, toda la energía proviene del sol. Incluso el petróleo y el carbón son, en cierto modo, luz solar concentrada, porque son consecuencia de la energía solar que recibieron las plantas y los animales hace millones de años. Por lo tanto, la cantidad de energía solar concentrada almacenada en un galón (cuatro litros y medio) de gasolina es mucho mayor que la energía que puede almacenar una batería. Este fue el problema fundamental al que se enfrentó Edison hace un siglo, y sigue siendo un problema actualmente.

Las células solares funcionan convirtiendo directamente la luz solar en electricidad. (Este proceso lo explicó Einstein en 1905. Cuando una partícula de luz, es decir, un fotón, choca con un metal, desplaza un electrón, generando así una corriente).

Sin embargo, las células solares no son eficientes. Incluso después de décadas de duro trabajo por parte de ingenieros y científicos, la eficiencia de una célula solar ronda el 15 por ciento. La investigación ha ido en dos direcciones. La primera consiste en aumentar la eficiencia de las células solares, lo cual constituye un problema técnico de muy difícil solución. La otra es reducir el coste de la fabricación, instalación y construcción de parques solares.

Por ejemplo, se podrían satisfacer las necesidades de electricidad de Estados Unidos cubriendo con células solares la totalidad del estado de Arizona, lo cual resulta poco práctico. Sin embargo, los derechos de explotación de amplias zonas del territorio saharaui se han convertido en los últimos tiempos en un tema candente, y los inversores ya están creando enormes parques solares en este desierto para satisfacer las necesidades de los consumidores europeos.

Otra posibilidad es que en las ciudades se reduzca el coste de la energía solar cubriendo los edificios con células solares. Esto tiene varias ventajas, incluida la eliminación de las pérdidas que se producen durante la transmisión de energía desde una planta generadora de energía. El problema es reducir los costes. Un rápido

cálculo muestra que habrá que ajustar lo máximo posible los precios para conseguir que estas empresas sean rentables.

Aunque la energía solar no está todavía en situación de cumplir su promesa, la reciente inestabilidad de los precios del petróleo ha hecho que se intensifiquen los esfuerzos para llevar finalmente la energía solar al mercado. Se están batiendo récords cada pocos meses. La producción de energía solar fotovoltaica crece un 45 por ciento anual, duplicándose prácticamente cada dos años. Las instalaciones fotovoltaicas suman actualmente en todo el mundo 15.000 megavatios, con un crecimiento de 5.600 megavatios solo en 2008.

En 2008, Florida Power & Light anunció el mayor proyecto de plantas solares de Estados Unidos. SunPower firmó un contrato para producir una potencia de 25 megavatios. (El récord actual de Estados Unidos lo tiene Nellis Air Force Base, de Nevada, cuya planta solar genera una potencia de 15 megavatios a partir de la energía solar).

En 2009, BrightSource Energy, con sede en Oakland, California, anunció un plan para batir el récord anterior construyendo catorce plantas solares que generarían 2.600 megavatios en California, Nevada y Arizona.

Uno de los proyectos de BrightSource es la planta solar de Ivanpah, que consiste en tres centrales termoeléctricas solares que se han de situar en el sur de California y producirán 440 megavatios de potencia. En un proyecto conjunto con Pacific Gas and Electric, BrightSource planea construir una planta de 1.300 megavatios en el desierto de Mojave.

En 2009, First Solar, la empresa más importante en el ranking mundial de fabricantes de células fotovoltaicas, anunció que crearía la mayor planta solar del mundo justo al norte de la Gran Muralla china. El contrato para diez años, cuyos detalles todavía se están negociando, contempla la construcción de un enorme complejo solar que contendrá 27 millones de paneles solares de capa fina que generarán una potencia de 2.000 megavatios, o el equivalente a la producción de dos centrales termoeléctricas alimentadas con carbón, y producirán energía suficiente para abastecer a tres millones de hogares. La planta, que cubrirá una superficie de casi 6.500 kilómetros cuadrados, se construirá en la Mongolia interior y en realidad forma parte de un parque energético mucho mayor. Los funcionarios chinos afirman que la energía solar es solo un componente de estas instalaciones, que finalmente suministrarán una potencia de 12.000 megavatios obtenida del viento, del sol, de la biomasa y de centrales hidroeléctricas.

Queda por ver si estos ambiciosos proyectos conseguirán finalmente superar mediante negociaciones el desafío de las inspecciones medioambientales y los sobrecostes, pero la cuestión es que los aspectos económicos de la energía solar están experimentando una amplia transformación, pues ya hay grandes empresas que consideran seriamente que la energía solar puede competir con la energía obtenida a partir de los combustibles fósiles.

EL COCHE ELÉCTRICO

Dado que aproximadamente la mitad del petróleo extraído en todo el mundo se utiliza para coches, camiones, trenes y aviones, hay un enorme interés por reformar este sector de la economía. Hoy en día se desarrolla una carrera por ver quién dominará el futuro de la automoción, cuando las naciones hagan la transición histórica de los combustible fósiles a la electricidad. Esta transición consta de distintas etapas. La primera es el coche híbrido, que ya está en el mercado y utiliza una combinación de electricidad (mediante una batería) y gasolina. Este diseño tiene un pequeño motor de combustión interna para resolver los problemas típicos de las baterías: es difícil crear una batería que pueda funcionar para largas distancias y proporcionar una aceleración instantánea.

Pero el modelo híbrido es un primer paso. El vehículo híbrido enchufable, por ejemplo, tiene una batería lo bastante potente como para que el coche recorra con energía eléctrica unos ochenta kilómetros antes de tener que recurrir al motor de gasolina. Dado que la mayoría de la gente hace sus desplazamientos al trabajo o para ir de compras recorriendo no más de ochenta kilómetros, estos coches pueden funcionar solo con electricidad para ese recorrido.

Un potente participante en esta carrera por el híbrido enchufable es el Chevrolet Volt, fabricado por General Motors. Tiene una autonomía de casi 65 kilómetros, utilizando solo una batería de ión de litio, y de casi 500 kilómetros con el pequeño motor de gasolina.

Además, está el Tesla Roadster, que no tiene motor de gasolina. Lo fabrica Tesla Motors, una empresa de Silicon Valley que es la única de Estados Unidos que vende coches totalmente eléctricos producidos en serie. El Roadster es un elegante coche deportivo que puede circular igual que cualquier coche de gasolina, descartando así la idea de que las baterías eléctricas de ión de litio no pueden competir con los motores de gasolina.

Tuve la oportunidad de conducir un Tesla de dos plazas, propiedad de John Hendricks, el fundador de Discovery Communications, empresa matriz de Discovery Channel. En cuanto me senté en el asiento del conductor, el señor Hendricks me dijo que pisara el acelerador con todas mis fuerzas para probar su coche. Seguí su consejo y hundí el acelerador. Inmediatamente sentí una súbita oleada de potencia. Mi cuerpo se hundió en el asiento cuando me puse a 100 kilómetros por hora en 3,9 segundos. Una cosa es oír cómo alardea un ingeniero sobre el rendimiento de los coches totalmente eléctricos, y otra cosa es pisar el acelerador y sentirlo uno mismo.

El éxito de la comercialización del Tesla ha obligado a los principales fabricantes de automóviles a ponerse al día, después de décadas de infravalorar el coche eléctrico. Robert Lutz, cuando era vicepresidente de General Motors, dijo: «Todos los genios que trabajaban aquí, en General Motors[5], no paraban de decir que la tecnología de los iones de litio llegaría en diez años, y Toyota estaba de acuerdo con

nosotros, pero, mira por dónde, aparece el Tesla. Entonces dije: “¿Cómo puede ser que una pequeña empresa de California que no ha hecho más que empezar, dirigida por unos individuos que no saben nada del negocio automovilístico, sea capaz de hacer esto y nosotros no?”».

Nissan Motors va en cabeza en la tarea de presentar el coche totalmente eléctrico al consumidor medio. El modelo se llama Leaf, tiene una autonomía de unos 160 kilómetros, una velocidad máxima de 145 kilómetros por hora, y es totalmente eléctrico.

Después del coche totalmente eléctrico, otro automóvil que causará sensación en las exposiciones es el vehículo de celda de combustible, al que llaman a veces el coche del futuro. En junio de 2008, Honda Motor Company anunció la presentación del primer vehículo de celda de combustible que iba a estar disponible en el mercado: el FCX Clarity. Posee una autonomía de casi 400 kilómetros, una velocidad máxima de 160 kilómetros por hora y todas las comodidades de un sedán de cuatro puertas. Al utilizar exclusivamente hidrógeno como combustible, no necesita gasolina ni carga eléctrica. Sin embargo, como todavía no existe la infraestructura necesaria para conseguir hidrógeno, solo está disponible en alquiler con derecho a compra y en California del Sur. Honda anuncia asimismo una versión en modelo deportivo de su vehículo de celda de combustible llamado FC Sport.

Posteriormente, en 2009, GM, que emergía de la bancarrota después de expulsar a su antigua dirección, anunció que su vehículo de celda de combustible, el Chevrolet Equinox, había pasado la marca del millón y medio de kilómetros en términos de pruebas. Durante los últimos veinticinco meses, cinco mil personas habían probado cien de aquellos vehículos de celda de combustible. Detroit, que siempre ha ido por detrás de Japón en cuanto a la tecnología de los coches pequeños y de los híbridos, intenta ahora conseguir un apoyo para el futuro.

Si hablamos superficialmente, el coche de celda de combustible es el coche perfecto. Funciona mediante una combinación de hidrógeno y oxígeno que luego se convierte en energía eléctrica, dejando solo agua como residuo. En absoluto produce humo. Resulta extraño mirar el tubo de escape de un vehículo de celda de combustible. En vez de expulsar humos tóxicos, lo que se ve son gotitas de agua incoloras e inodoras.

«Si ponemos la mano sobre el tubo de escape, lo único que sale es agua. Es una sensación nueva y extraña», observaba Mike Schwabl[6], que condujo el Equinox en pruebas durante diez días.

La tecnología de las celdas de combustible no es nueva. El principio básico se demostró en 1839. Durante décadas, La NASA ha utilizado celdas de combustible para suministrar energía a sus instrumentos en el espacio. Lo nuevo es la decisión de los fabricantes de coches de aumentar la producción y reducir los costes.

Otro problema al que se enfrenta el coche de celda de combustible es el mismo que perseguía a Henry Ford cuando sacó al mercado el Modelo T. Las voces críticas

afirmaron que la gasolina era peligrosa, y que la gente moriría en horribles accidentes automovilísticos, quemados vivos en un choque. Además, se necesitaría una gasolinera casi en cada manzana de casas. En todos estos aspectos, las críticas eran acertadas. La gente muere a miles cada año en horribles accidentes de tráfico, y vemos gasolineras por todas partes. La conveniencia y la utilidad del coche son tan grandes que la gente ignora estos hechos.

Ahora se están planteando las mismas objeciones en contra de los vehículos de celda de combustible. El combustible de hidrógeno es volátil y explosivo, y tendrían que instalarse estaciones de servicio para repostar hidrógeno a pocas manzanas de distancia unas de otras. Lo más probable es que las voces críticas tengan razón de nuevo. Sin embargo, una vez que se haya montado la infraestructura del hidrógeno, la gente verá que los vehículos de celda de combustible son muy convenientes, porque no contaminan, con lo que pasarán por alto todos los inconvenientes. Actualmente en Estados Unidos solo hay setenta estaciones de servicio donde los vehículos de celda de combustible pueden repostar. Dado que estos vehículos tienen una autonomía de unos 270 kilómetros con cada depósito lleno, esto significa que no hay que perder de vista el indicador del combustible mientras conducimos. Pero esto irá cambiando gradualmente, sobre todo si el precio de los coches de celda de combustible empiezan a bajar debido a la producción en masa y los avances tecnológicos.

Ahora bien, el principal problema del coche eléctrico es que la batería no crea energía a partir de la nada. En primer lugar, hay que cargar la batería, y esa electricidad suele provenir de una central termoeléctrica alimentada con carbón. Por lo tanto, aunque el coche eléctrico no produce contaminación, en última instancia su fuente de energía está en los combustibles fósiles.

El hidrógeno no es en sí mismo un productor de energía, sino que más bien la transporta. En primer lugar, hay que producir gas hidrógeno. Por ejemplo, hay que utilizar electricidad para separar el agua en hidrógeno y oxígeno. Por consiguiente, aunque los coches eléctricos y los de celda de combustible nos prometen un futuro sin contaminación atmosférica, sigue existiendo el problema de que la energía que usan proviene en gran medida de la combustión del carbón. En última instancia, chocamos con la primera ley de la termodinámica: la cantidad total de materia y energía no puede destruirse, ni tampoco crearse a partir de la nada. En definitiva, no se puede obtener algo a cambio de nada.

Esto significa que, al hacer la transición de la gasolina a la electricidad, tenemos que sustituir las centrales termoeléctricas de carbón por una forma de producción de energía totalmente nueva.

LA FISIÓN NUCLEAR

Una de las formas posibles de crear energía, no solo de transmitirla, es dividir el átomo de uranio. La ventaja que esto aporta es que la energía nuclear no produce grandes cantidades de gases de efecto invernadero, cosa que sí hacen las centrales termoeléctricas alimentadas con carbón o petróleo, si bien algunos problemas técnicos y políticos han frenado la producción de energía nuclear durante décadas. La última central nuclear de Estados Unidos empezó a construirse en 1977, antes del fatídico accidente de 1979 en Three Mile Island, que paralizó el futuro de la energía nuclear comercial. En 1986, el devastador accidente de Chernóbil marcó el destino de la energía nuclear para toda una generación. Los proyectos relacionados con la energía nuclear se paralizaron en Estados Unidos y en Europa, aunque se mantuvieron en marcha en Francia, Japón y Rusia, pero solo gracias a los generosos subsidios de los gobiernos.

El problema que plantea la energía nuclear es que, cuando se divide el átomo de uranio, se producen enormes cantidades de residuos nucleares, que permanecen radiactivos durante intervalos de entre miles y decenas de millones de años. Un reactor de 1.000 megavatios produce en un año unas 30 toneladas de residuos altamente radiactivos. Estos residuos son tan radiactivos que literalmente brillan como brasas en la oscuridad y han de almacenarse en unas piscinas especiales para que se enfríen. Dado que hay alrededor de 100 reactores comerciales en Estados Unidos, la cantidad de residuos altamente radiactivos producidos anualmente asciende a miles de toneladas.

Estos residuos nucleares ocasionan problemas por dos razones. La primera es que siguen calientes incluso después de que el reactor ha sido apagado. Si el agua del sistema de refrigeración deja de circular accidentalmente, como sucedió en Three Mile Island, el núcleo comienza a fundirse. Si este metal fundido entra en contacto con el agua, puede producir una explosión de vapor que rompe el reactor, con lo que se lanzan al aire toneladas de escombros altamente radiactivos. En el caso aún peor de un accidente nuclear de nivel 9, quizá habría que evacuar inmediatamente a millones de personas a una distancia de entre 15 y 80 kilómetros del reactor. El reactor de Indian Point se encuentra a 38 kilómetros al norte de la ciudad de Nueva York. Un estudio gubernamental estima que un accidente en Indian Point podría costar probablemente cientos de miles de millones de dólares en daños materiales. En Three Mile Island fue cuestión de minutos que el reactor no produjera una catástrofe que habría devastado el nordeste del país. El desastre se evitó en el último momento, cuando unos trabajadores de la central consiguieron reintroducir agua refrigerante en el núcleo apenas treinta minutos antes del instante en que dicho núcleo habría alcanzado el punto de fusión del dióxido de uranio.

En Chernóbil, a las afueras de Kíev, la situación fue mucho peor. El mecanismo de seguridad (las barras de regulación) fue desactivado manualmente por los trabajadores de la central. Se produjo una pequeña sobretensión que puso el reactor fuera de control. El agua fría, al verterse de repente sobre el metal fundido, causó una

explosión de vapor que voló por completo la parte superior del reactor, lanzando una gran parte del núcleo al aire. Muchos de los trabajadores enviados a controlar el accidente acabaron muriendo de forma horrible a causa de las quemaduras que les produjo la radiación. Finalmente, cuando el reactor ardió fuera de control, hubo que llamar a la Fuerza Aérea Soviética. Unos helicópteros provistos de un blindaje especial fueron enviados a rociar el reactor en llamas con agua boratada. Por último, hubo que encerrar el núcleo en hormigón sólido. Incluso ahora, el núcleo sigue siendo inestable y continúa generando calor y radiación.

Además de los problemas de fusiones y explosiones, está también la cuestión de la evacuación de los residuos. ¿Dónde podemos depositarlos? Resulta embarazoso decirlo, pero tras cincuenta años de era atómica aún no hay respuesta. En el pasado se cometieron toda una serie de errores, de los que se pagan caros, en lo relativo al depósito permanente de los residuos. Inicialmente, Estados Unidos y Rusia depositaron algunos residuos en el fondo de los océanos, o simplemente los enterraron en fosas poco profundas. En los montes Urales tuvo lugar una catástrofe en 1957, cuando un vertido de residuos de plutonio explotó, lo cual hizo necesaria una evacuación masiva de personas y causó daños por radiaciones en una superficie de más de 1.000 kilómetros cuadrados entre Sverdlovsk y Cheliábinsk.

Al principio, en la década de 1970, Estados Unidos intentó enterrar residuos altamente radiactivos en Lyons, Kansas, en el interior de unas minas de sal. Sin embargo, posteriormente se descubrió que aquellas minas de sal eran inutilizables, porque estaban ya plagadas de agujeros perforados por buscadores de petróleo y gas. El gobierno de Estados Unidos se vio obligado a cerrar el cementerio nuclear de Lyons, lo cual le supuso un embarazoso revés.

Durante los veinticinco años siguientes, Estados Unidos gastó 9.000 millones de dólares en proyectar y construir el gigantesco cementerio nuclear de Yucca Mountain, en Nevada, solo para que en 2009 lo cerrara el presidente Barack Obama. Los geólogos han declarado que el emplazamiento de Yucca Mountain será incapaz de almacenar residuos nucleares durante 10.000 años. Nunca se volverá a abrir, dejando a los operadores comerciales de las centrales nucleares sin una instalación permanente de almacenamiento de residuos.

Actualmente, el futuro de la energía nuclear es incierto. A Wall Street le asusta la idea de invertir varios miles de millones de dólares en cada nueva central nuclear. Pero la industria insiste en que las centrales de última generación son más seguras que las anteriores. Entretanto, el Departamento de Energía mantiene abiertas sus decisiones relativas a la energía nuclear.

PROLIFERACIÓN NUCLEAR

Un gran poder trae consigo también un gran peligro. En la mitología nórdica, por ejemplo, los vikingos adoraban a Odín, que gobernaba Asgard con sabiduría y justicia. Odín reinaba sobre una legión de dioses, incluido el heroico Thor, cuyas virtudes de honor y valor eran las cualidades más apreciadas en cualquier guerrero. Sin embargo, también estaba Loki, el dios de la maldad, que estaba consumido por los celos y el odio. Era un consumado intrigante y destacaba en el arte de la falsedad y el engaño. Al final, Loki conspiró con los gigantes para organizar la batalla definitiva entre las tinieblas y la luz, la épica batalla de Ragnarök, el ocaso de los dioses.

Hoy en día, el problema es que las envidias y los odios entre las naciones podrían desencadenar una Ragnarök nuclear. La historia ha demostrado que, cuando una nación domina la tecnología comercial, puede hacer la transición a las armas nucleares, si tiene el deseo y la voluntad política para ello. El peligro es que la tecnología de las armas nucleares proliferará en algunas de las regiones más inestables del mundo.

Durante la Segunda Guerra Mundial, solo las naciones más grandes del planeta poseían los recursos, la tecnología y la capacidad que se necesitaban para fabricar una bomba atómica. Sin embargo, en el futuro el umbral puede bajar radicalmente cuando el precio del uranio enriquecido caiga en picado a causa de la introducción de nuevas tecnologías. Este es el peligro al que nos enfrentamos: la renovación y el abaratamiento de las tecnologías puede poner la bomba atómica en manos inestables.

La clave para fabricar la bomba atómica es asegurarse grandes cantidades de mineral de uranio y luego purificarlo. Esto significa separar el uranio 238 (que constituye el 99,3 por ciento del uranio que se encuentra en la naturaleza) del uranio 235, que es el adecuado para una bomba atómica, pero solo llega al 0,7 por ciento. Estos dos isótopos son químicamente idénticos, por lo que el único modo de separarlos fiablemente es aprovechar el hecho de que el uranio 235 pesa un 1 por ciento menos que su pariente.

Durante la Segunda Guerra Mundial, el único modo de separar los dos isótopos era el laborioso proceso de la difusión gaseosa: el uranio se convertía en gas (hexafluoruro de uranio) y luego se le hacía descender por kilómetros de tuberías y membranas. Al final de este largo viaje, el uranio 235, por ser más rápido (es decir, más ligero), ganaba la carrera, dejando atrás al uranio 238, que es más pesado. Después de extraer el gas que contenía el uranio 235, se repetía el proceso hasta que el nivel de enriquecimiento del uranio 235 subiera del 0,7 por ciento al 90 por ciento, que es el uranio adecuado para la bomba. Pero la introducción del gas necesario requiere enormes cantidades de electricidad. Con este fin, durante la guerra, una parte significativa del suministro eléctrico de Estados Unidos se desvió al laboratorio nacional de Oak Ridge. La planta de enriquecimiento era gigantesca, ocupaba unos 186.000 metros cuadrados y daba trabajo a 12.000 personas.

Después de la guerra, solo las superpotencias, Estados Unidos y la Unión Soviética, podían acumular grandes arsenales nucleares, hasta 30.000 cada uno, porque dominaban el arte de la difusión gaseosa. Sin embargo, actualmente solo el 33 por ciento del uranio enriquecido que hay en todo el planeta procede de la difusión gaseosa.

Las plantas de enriquecimiento de uranio de segunda generación utilizan una tecnología más sofisticada y más barata, las ultracentrifugadoras, que han producido un cambio drástico en la política mundial. En las plantas de enriquecimiento de uranio por ultracentrifugación se utiliza el procedimiento de hacer girar una cápsula que contiene uranio, llegando a velocidades de 100.000 revoluciones por minuto. Esto acentúa el 1 por ciento de diferencia en cuanto a masa entre el uranio 235 y el uranio 238. Finalmente, el uranio 238 cae a la parte inferior de la cápsula. Después de muchas revoluciones, se puede retirar el uranio 235 de la parte superior del tubo.

Las ultracentrifugadoras son, en cuanto a energía, cincuenta veces más eficientes que la difusión gaseosa. Alrededor del 54 por ciento del uranio de todo el mundo se purifica de esta manera.

Con la tecnología de las ultracentrifugadoras se necesitan solo 1.000 de estos aparatos funcionando continuamente durante un año para producir el uranio enriquecido que utiliza una bomba atómica. La tecnología de las ultracentrifugadoras puede robarse fácilmente. En uno de los más graves quebrantos de la seguridad nuclear que se han producido en la historia, un oscuro ingeniero atómico, A. Q. Khan, consiguió robar los proyectos de la ultracentrifugadora y de los componentes de la bomba atómica y venderlos para su propio beneficio. En 1975, mientras trabajaba en Amsterdam para URENCO, una empresa fundada por los británicos, los alemanes occidentales y los holandeses para suministrar uranio a los reactores europeos, entregó estos proyectos secretos al gobierno paquistaní, que le ensalzó como a un héroe nacional. Asimismo, es sospechoso de haber vendido esta información confidencial a Sadam Husein y a los gobiernos de Irán, Corea del Norte y Libia.

Utilizando esta tecnología robada, Pakistán pudo crear un pequeño arsenal de armas nucleares, que comenzó a probar en 1998. La consiguiente rivalidad nuclear entre Pakistán y la India, que hizo que cada uno de ellos explotara una serie de bombas atómicas, llevó casi a una confrontación nuclear entre estas dos naciones rivales.

Quizá a causa de la tecnología vendida por A. Q. Khan, Irán aceleró al parecer su programa nuclear, instalando 8.000 ultracentrifugadoras en 2010, con intención de instalar 30.000 más. Esto presionó a otros estados de Oriente Próximo para crear sus propias bombas atómicas, fomentando así la inestabilidad.

La segunda razón por la que la geopolítica del siglo XXI podría sufrir alteraciones es que otra generación de tecnología del enriquecimiento (enriquecimiento por láser) está llegando, siendo potencialmente aún más barata que las ultracentrifugadoras.

Si se examinan las capas de electrones de estos dos isótopos de uranio, resultan ser aparentemente lo mismo, ya que los núcleos tienen la misma carga. Pero si se analizan con mayor detenimiento las ecuaciones de las capas de electrones, se descubre una ligerísima diferencia de energía entre las capas de electrones del uranio 235 y las del uranio 238. Mediante un rayo láser sintonizado con una precisión extrema, es posible sacar electrones de la corteza del uranio 235, pero no de la del uranio 238. Una vez que los átomos de uranio 235 están ionizados, pueden separarse fácilmente de los átomos de uranio 238 mediante un campo eléctrico.

Sin embargo, la diferencia de energía entre los dos isótopos es tan pequeña que muchas naciones han intentado aprovechar este hecho y han fracasado. En las décadas de 1980 y 1990, Estados Unidos, Francia, Reino Unido, Alemania, Sudáfrica y Japón se propusieron sin éxito llegar a dominar esta difícil tecnología. En Estados Unidos se implicaron 500 científicos en el intento y se invirtieron 2.000 millones de dólares.

Pero, en 2006, unos científicos australianos anunciaron que no solo habían resuelto el problema, sino que tenían intención de comercializar su hallazgo. Dado que el 30 por ciento del coste del uranio se debe al proceso de enriquecimiento, la empresa australiana Silex cree que podría haber un mercado para esta tecnología. Silex llegó incluso a firmar un contrato con General Electric para iniciar la comercialización. En definitiva, utilizando este método, esperan producir hasta un tercio del uranio que se utiliza en el planeta. En 2008, GE Hitachi Nuclear Energy anunció sus planes para construir la primera planta comercial de enriquecimiento mediante láser en Wilmington, Carolina del Norte, en 2012. La planta ocupará 81 hectáreas de un terreno de 647 hectáreas[7].

Esta es una buena noticia para la industria nuclear, ya que el coste del uranio enriquecido descenderá durante los próximos años. Sin embargo, otros están preocupados porque es solo cuestión de tiempo que esta tecnología prolifere en las regiones más inestables del planeta. En otras palabras, tenemos la oportunidad de firmar acuerdos para restringir y regular el flujo de uranio enriquecido. A menos que controlemos esta tecnología, la bomba continuará proliferando, quizá llegando incluso a manos de grupos terroristas.

Uno de mis conocidos era el difunto Theodore Taylor, que tenía el dudoso honor de haber diseñado algunas de las ojivas atómicas más grandes y más pequeñas para el Pentágono. Uno de sus diseños fue la Davy Crockett, que pesaba poco más de 22 kilos y medio, pero podía lanzar una pequeña bomba atómica contra el enemigo. Taylor fue un defensor tan ardiente de las bombas atómicas que trabajó en el Proyecto Orión, en el que se iban a utilizar dichas bombas para propulsar una nave espacial hacia estrellas cercanas. Taylor calculó que, dejando caer bombas atómicas sucesivamente y sin parar, la onda de choque resultante impulsaría la nave espacial hasta que esta alcanzara casi la velocidad de la luz.

Una vez le pregunté por qué había perdido la ilusión por el diseño de bombas atómicas y había pasado a trabajar en la energía solar. Me dijo confidencialmente que tenía una pesadilla recurrente. Sentía que su trabajo en el campo de las armas nucleares conducía a una cosa: producir ojivas atómicas de tercera generación. (Las ojivas de primera generación, diseñadas en la década de 1950, eran enormes y difíciles de transportar hasta sus objetivos. Las ojivas de segunda generación, diseñadas en la década de 1970, eran tan pequeñas y compactas que diez de ellas cabían en el cono frontal de un misil. Pero las bombas de tercera generación son «bombas de diseño», configuradas específicamente para funcionar en diversos entornos, como la selva, el desierto e incluso el espacio exterior). Una de estas bombas de tercera generación es una bomba atómica en miniatura, tan pequeña que un terrorista podría llevarla en un maletín y utilizarla para destruir una ciudad entera. La idea de que el trabajo de toda su vida podría ser utilizado algún día por un terrorista atormentó a Taylor durante el resto de sus días.

MEDIADOS DE SIGLO
(DESDE 2030 HASTA 2070)

EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Hacia mediados de siglo, el impacto de una economía basada en los combustibles fósiles habrá alcanzado sus cotas más altas: el calentamiento global. Actualmente es indiscutible que el planeta se está calentando. En el siglo pasado, la temperatura de la Tierra aumentó en 0,72 °C, y el aumento se está acelerando. Dondequiera que miremos, los signos son inconfundibles:

- En el Ártico el espesor del hielo ha disminuido en un asombroso 50 por ciento durante los últimos 50 años. Gran parte de este hielo del Ártico está a una temperatura justo inferior al punto de congelación y flota sobre el agua. Por consiguiente, es extremadamente sensible a cualquier pequeña variación de temperatura de los océanos y actúa como un canario en un pozo minero, es decir, como un sistema de alarma inmediata. Hoy en día, los casquetes glaciares del polo Norte desaparecen en parte durante los meses estivales, y dentro de poco, a partir de 2015, podrán desaparecer del todo durante el verano. El casquete glaciar polar podría desaparecer permanentemente a finales de siglo, lo cual modificaría el clima terrestre al alterar el flujo del océano y de las corrientes de aire por todo el planeta.
- Las plataformas de hielo de Groenlandia se redujeron en 62 kilómetros cuadrados en 2007[8]. Estas cifras se dispararon hasta 184 kilómetros

cuadrados en 2008. (Si todo el hielo de Groenlandia se fundiera, el nivel del mar ascendería unos 6 metros por todo el planeta.)

- Grandes porciones de hielo de la Antártida que han permanecido estables durante decenas de miles de años se están desprendiendo gradualmente[9]. En el año 2000 se desprendió un trozo del tamaño de Connecticut que contenía 10.900 kilómetros cuadrados de hielo. En 2002, un pedazo de hielo del tamaño de Rhode Island se desprendió del glaciar de Thwaites. (Si se fundiera todo el hielo de la Antártida, el nivel del mar ascendería unos 55 metros por todo el planeta.)
- Por cada ascenso vertical de 30 centímetros en el nivel de los océanos, estos avanzarían en una extensión horizontal de 30 metros. El nivel de los mares ha ascendido ya unos 20 centímetros durante el último siglo, principalmente a causa de la dilatación del agua marina a medida que se calentaba. Según la Organización de las Naciones Unidas, el nivel de los mares podría elevarse entre 18 y 58 centímetros de aquí a 2100. Algunos científicos han comentado que el informe de la ONU era demasiado cauteloso en su interpretación de los datos. Según los científicos del Instituto de Investigación Ártica y Alpina de la Universidad de Colorado[10], en 2100 el nivel de los mares podría haber ascendido entre 91 y 183 centímetros. Por consiguiente, el mapa de nuestras costas irá cambiando gradualmente.
- Las temperaturas empezaron a ser registradas de una manera fiable a finales del siglo XVIII; los años 1995, 2005 y 2010 han sido los años más calientes que se han registrado; la década transcurrida de 2000 a 2009 ha sido la más fría. Asimismo, los niveles de dióxido de carbono están ascendiendo a una gran velocidad. Se encuentran en los valores más altos que han existido en 100.000 años.
- A medida que la Tierra se calienta, las enfermedades tropicales van emigrando poco a poco hacia el norte. La reciente propagación del virus del Nilo occidental, transmitido por unos mosquitos, puede ser un aviso de lo que va a llegar. Los funcionarios de la ONU están especialmente preocupados por la propagación de la malaria hacia el norte. Habitualmente, los huevos de muchos insectos perniciosos mueren en invierno cuando el suelo se hiela. Pero con el acortamiento de la estación invernal es inevitable la propagación de insectos dañinos hacia el norte.

DIÓXIDO DE CARBONO: GASES DE EFECTO INVERNADERO

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, surgido en el seno de la ONU, los científicos han llegado con un 90 por ciento de fiabilidad a la conclusión de que el calentamiento global está producido por la actividad humana, especialmente por la producción de dióxido de carbono en la combustión de carbón y derivados del petróleo. La luz solar atraviesa fácilmente el dióxido de carbono. Pero, cuando esta luz calienta la Tierra, crea una radiación de infrarrojos que no tiene tanta facilidad para atravesar en sentido contrario el dióxido de carbono. La energía aportada por la luz solar no puede regresar al espacio y queda atrapada.

Vemos un efecto en cierto modo similar en los invernaderos y en los coches. La luz solar calienta el aire, y este no puede escapar porque se lo impide el cristal.

Resulta inquietante el hecho de que la cantidad de dióxido de carbono haya crecido de una manera explosiva, especialmente durante el último siglo. Antes de la revolución industrial, el contenido de dióxido de carbono del aire era 270 partes por millón (ppm). Actualmente ha ascendido hasta 387 ppm. (En 1900 se consumieron en el planeta 150 millones de barriles de petróleo[11]. En 2000, esta cantidad se multiplicó por 185, ascendiendo a 28.000 millones de barriles. En 2008 fueron 9.400 millones de toneladas de dióxido de carbono las que se enviaron a la atmósfera mediante la combustión de combustibles fósiles, y también por la deforestación, de las cuales solo 5.000 millones de toneladas se reciclaron en los océanos, los suelos y la vegetación. El resto se quedará en la atmósfera durante las décadas venideras, causando el calentamiento del planeta).

UNA VISITA A ISLANDIA

El ascenso de la temperatura no es una casualidad, como podemos ver analizando testigos extraídos del hielo. Perforando profundamente en los antiguos hielos del Ártico, los científicos han conseguido extraer burbujas de aire que datan de hace miles de años. Realizando un análisis químico del aire que contienen esas burbujas, los científicos pueden reconstruir la temperatura y el contenido de dióxido de carbono de la atmósfera, retrocediendo más de 600.000 años en el tiempo. Pronto podrán determinar las condiciones climáticas remontándose a hace más de un millón de años.

Tuve la oportunidad de ver esto de primera mano. En una ocasión pronuncié una conferencia en Reikiavik, la capital de Islandia, y tuve el privilegio de visitar la Universidad de Islandia, donde se analizan los testigos de hielo. Cuando el avión aterriza en Reikiavik, lo primero que se ve es nieve y rocas puntiagudas en algo que parece el desolado paisaje de la Luna. Aunque es árido e inhóspito, este terreno hace que el Ártico sea un lugar ideal para analizar el clima que tenía la Tierra hace cientos de miles de años.

Cuando fui a visitar el laboratorio, que se mantiene a temperaturas heladoras, tuve que pasar por gruesas puertas de refrigerador. Una vez dentro, pude ver una gran

cantidad de estantes que contenían largos tubos de metal, cada uno de ellos más o menos de cuatro centímetros de diámetro y unos tres metros de largo. Cada uno de los tubos huecos se había clavado profundamente en el hielo de un glaciar. A medida que penetraba en el hielo, el tubo tomaba muestras de nieves que habían caído hace miles de años. Cuando retiraron los tubos, pude examinar detenidamente el helado contenido de cada tubo. Al principio, todo lo que se veía era una larga columna de hielo blanco. Sin embargo, al examinarla más de cerca, vi que el hielo tenía rayas formadas por diminutas bandas de distintos colores.

Los científicos tienen que utilizar diversas técnicas para datarlas. Algunas de las capas de hielo contienen marcadores que indican acontecimientos importantes, tales como el hollín emitido por una erupción volcánica. Puesto que las fechas de esas erupciones se conocen con gran precisión, pueden usarse para determinar la edad de las capas.

A continuación, cortaban los testigos de hielo en varias rodajas para poder examinarlos. Cuando miré una de estas rodajas con el microscopio, vi unas burbujas microscópicas. Me estremecí al darme cuenta de que estaba viendo unas burbujas de aire depositadas allí hace decenas de miles de años, antes incluso del surgimiento de la civilización humana.

Es fácil medir el contenido de dióxido de carbono que hay dentro de cada burbuja. Sin embargo, es más difícil calcular la temperatura que tenía el aire cuando se depositó el hielo por primera vez. (Para hacer esto, los científicos analizan el agua que hay en cada burbuja. Las moléculas de agua pueden contener diversos isótopos. Cuando la temperatura baja, los isótopos más pesados del agua se condensan más rápido que las moléculas de agua corrientes. Por lo tanto, midiendo la cantidad de los isótopos más pesados, se puede calcular la temperatura a la que se condensó la molécula de agua).

Por fin, después de analizar laboriosamente los contenidos de miles de testigos de hielo, estos científicos han llegado a algunas conclusiones importantes. Han descubierto que los niveles de dióxido de carbono y las temperaturas habían oscilado en paralelo, como dos montañas rusas que se movieran conjuntamente, sincronizadas durante muchos miles de años. Cuando una curva asciende o desciende, la otra hace lo mismo.

Y, lo que es más importante, han descubierto un máximo repentino en la temperatura y el contenido de dióxido de carbono que se produjo precisamente durante el siglo pasado. Esto es extremadamente inusual, ya que la mayoría de las fluctuaciones se producen de una manera lenta a lo largo de milenios. Los científicos afirman que este máximo tan inusual no forma parte de un proceso natural de calentamiento, sino que es un indicador directo de la actividad humana.

Hay otros modos de demostrar que este máximo repentino tiene su causa en la actividad humana, y no en ciclos naturales. Las simulaciones realizadas mediante ordenador están ahora mismo tan avanzadas que podemos simular la temperatura del

planeta con o sin la presencia de actividad humana. Sin una civilización productora de dióxido de carbono, nos encontraríamos con una curva de temperaturas relativamente plana. Pero, al añadir la actividad humana, podemos demostrar que se tendría que producir un máximo repentino tanto en la temperatura como en el contenido de dióxido de carbono. El máximo predicho encaja perfectamente con el máximo real.

Finalmente, puede medirse la cantidad de luz solar que incide sobre cada metro cuadrado de superficie terrestre. Los científicos pueden calcular también la cantidad de calor que se refleja y es enviado desde la Tierra al espacio exterior. Normalmente sería de esperar que ambas cantidades fueran iguales, con la entrada de calor igual a la emisión del mismo. Sin embargo, en la realidad nos encontramos con la cantidad neta de energía que está calentando actualmente el planeta. Además, si calculamos la cantidad de energía que produce la actividad humana, hay una coincidencia perfecta. Por consiguiente, la actividad humana es la causante del calentamiento actual de la Tierra.

Por desgracia, incluso si detuviéramos inmediatamente la producción de dióxido de carbono, el gas que ha sido ya liberado a la atmósfera es suficiente para que el calentamiento global continúe durante décadas.

Como consecuencia, a mediados de este siglo la situación podría ser espantosa.

Los científicos han pronosticado cómo serán nuestras ciudades costeras a mediados de siglo y en tiempos posteriores si el nivel de los mares continúa ascendiendo. Algunas ciudades costeras podrían desaparecer. Grandes zonas de Manhattan tendrían que ser evacuadas, y Wall Street quedaría bajo el agua. Los gobiernos tendrán que decidir cuáles de sus grandes ciudades y capitales vale la pena salvar y cuáles tienen un futuro sin esperanza. Algunas ciudades podrían salvarse mediante una combinación de sofisticados diques y compuertas. Otras ciudades se considerarían perdidas sin remedio posible, y se dejaría que desaparecieran bajo el océano, dando lugar así a emigraciones masivas de la población. Dado que la mayoría de los grandes centros comerciales y poblacionales del mundo están cerca de los océanos, esto podría tener un efecto desastroso en la economía mundial.

Aunque algunas urbes puedan salvarse, persiste el riesgo de que fuertes tormentas puedan enviar grandes mareas que inunden una ciudad, paralizando sus infraestructuras. Por ejemplo, en 1992 una enorme marea tormentosa inundó Manhattan, paralizando el metro y los trenes que iban a New Jersey. Con el transporte inundado, se produce un frenazo de la economía.

INUNDACIONES EN BANGLADESH Y VIETNAM

Un informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático localizó tres puntos de alto riesgo de desastre: Bangladesh, el delta del Mekong en

Vietnam y el delta del Nilo en Egipto.

La situación más grave es la de Bangladesh, un país que se inunda con regularidad a causa de las lluvias, y que lo haría incluso sin que existiera el calentamiento global. La mayor parte del país es plana y está al nivel del mar. Aunque ha progresado significativamente durante las últimas décadas, sigue siendo una de las naciones más pobres del planeta, con una de las densidades de población más altas. (Tiene 161 millones de habitantes, cifra que es comparable a la de Rusia, pero con 1/120 de la superficie de esta última). Un 50 por ciento de su territorio estaría inundado permanentemente si el nivel del mar subiera 90 centímetros. Las catástrofes naturales se producen allí casi todos los años, pero en septiembre de 1998 el mundo contempló horrorizado un adelanto de lo que puede llegar a ser habitual. Una devastadora inundación sumergió dos tercios del país, dejando a 30 millones de personas sin hogar casi de la noche a la mañana; 1.000 personas murieron, y más de 9.000 kilómetros de carretera quedaron destruidos. Fue uno de los peores desastres naturales de la historia moderna.

Otro país que se vería devastado por una elevación del nivel del mar es Vietnam, donde el delta del Mekong resultaría especialmente vulnerable. Hacia mediados de siglo, este país de 87 millones de habitantes podría enfrentarse a la desaparición de su principal zona agrícola. En Vietnam la mitad del arroz se cultiva en el delta del Mekong, donde además viven 17 millones de personas, y gran parte de esta zona quedaría inundada permanentemente si se eleva el nivel de los mares. Según las previsiones del Banco Mundial, si a mediados de siglo el nivel de los mares asciende 90 centímetros, un 11 por ciento de la población se vería desplazada. Además, como el delta del Mekong quedaría inundado de agua salada, el fértil suelo de esa zona resultaría destruido de forma permanente. Si la inundación expulsa de sus hogares a millones de personas en Vietnam, muchas de ellas acudirán en masa a la ciudad de Ho Chi Minh en busca de refugio, si bien una cuarta parte de la ciudad también estará bajo las aguas.

En 2003, el Pentágono encargó un estudio, realizado por la Global Business Network, en el que se ponía de manifiesto que, en el peor de los casos, el caos se extendería por todo el mundo a causa del calentamiento global. Como serían millones los refugiados que cruzarían las fronteras de los estados, los gobiernos podrían perder toda su autoridad y paralizarse, con lo que algunos países podrían sumirse en la pesadilla de saqueos, revueltas y caos. En esta situación desesperada, las naciones, al verse frente a una posible afluencia de millones de personas desesperadas, podrían recurrir a las armas nucleares.

«Imaginemos que Pakistán, la India y China —países que disponen todos ellos de armas nucleares— tuvieran escaramuzas en sus fronteras a causa de los refugiados, el acceso a ríos cuyas orillas comparten y a tierras cultivables», decía el informe[12]. Peter Schwartz, fundador de la Global Business Network y principal autor de este estudio para el Pentágono, me habló confidencialmente sobre los detalles de esta

situación. Me dijo que el punto más caliente sería la frontera entre la India y Bangladesh. Como consecuencia de una crisis importante en Bangladesh, hasta 160 millones de personas se verían forzadas a salir de sus hogares, provocando las mayores migraciones de la historia de la humanidad. Las tensiones podrían dar lugar rápidamente a un desplome de las fronteras, los gobiernos locales quedarían paralizados y estallarían rebeliones de las masas. Schwartz contempla la posibilidad de que las naciones utilicen armas nucleares como último recurso.

En la peor de las situaciones posibles, podríamos tener un efecto invernadero que se autoalimentase. Por ejemplo, el derretimiento de la tundra en las regiones árticas podría liberar millones de toneladas de gas metano procedente de la vegetación que se encontrara en estado de putrefacción. La tundra cubre unos veintitrés millones de kilómetros cuadrados en el hemisferio norte y contiene vegetación congelada desde la última glaciación, que tuvo lugar hace decenas de miles de años. Esta tundra contiene más dióxido de carbono y metano que la atmósfera, lo cual supone una muy seria amenaza para el clima en todo el planeta. Además, el gas metano es un gas de efecto invernadero mucho más mortífero que el dióxido de carbono. No permanece tanto tiempo en la atmósfera, pero causa muchos más daños que el dióxido de carbono. La liberación de tanta cantidad de gas metano por el derretimiento en la tundra podría tener como efecto que las temperaturas ascendieran rápidamente, lo cual haría que se liberase todavía más gas metano, dando lugar así a un ciclo incontrolado de calentamiento global.

DIFICULTADES TÉCNICAS

La situación es terrible, pero aún no hemos alcanzado el punto de no retorno. El problema de controlar los gases de efecto invernadero es en gran medida económico y político; no es un problema técnico. La producción de dióxido de carbono coincide con la actividad económica y, por consiguiente, con la generación de riqueza. Por ejemplo, Estados Unidos genera aproximadamente el 25 por ciento del dióxido de carbono de todo el mundo. Esto se debe a que Estados Unidos tiene más o menos un 25 por ciento de la actividad económica del planeta. Y en 2009, China superó a Estados Unidos en la producción de gases de efecto invernadero, principalmente a causa del crecimiento explosivo de su economía. Esta es la razón fundamental por la que las naciones son tan reacias a hacerse responsables del calentamiento global: interfiere con la actividad y la prosperidad económicas.

Se han ideado distintos planes para tratar esta crisis global, pero en última instancia puede que un rápido ajuste no sea suficiente. Solo un cambio importante en nuestro modo de consumir energía resolverá el problema. Algunas de estas medidas técnicas han encontrado el respaldo de científicos serios, pero no han suscitado una amplia aceptación. Entre las distintas propuestas figuran las siguientes:

- **Lanzar contaminantes a la atmósfera**. Una de las propuestas es enviar cohetes a las zonas más altas de la atmósfera, donde liberarían sustancias contaminantes tales como dióxido de azufre, con el fin de reflejar la luz del sol, enviándola de vuelta al espacio y refrescando así la Tierra. De hecho, el premio Nobel Paul Crutzen ha abogado por lanzar la polución atmosférica al espacio en una especie de «mecanismo del Día del Juicio Final», consiguiendo así una vía de escape definitiva para que la humanidad detenga el calentamiento global. Esta idea data de 1991, cuando unos científicos monitorizaron detenidamente la enorme explosión volcánica del monte Pinatubo, en las islas Filipinas, que lanzó 10.000 millones de toneladas de polvo y escombros a la parte superior de la atmósfera. Esto oscureció los cielos e hizo que la temperatura media bajara aproximadamente medio grado en todo el planeta. Gracias a esto se pudo calcular qué cantidad de contaminantes sería necesaria para reducir la temperatura de la Tierra. Aunque la propuesta es seria, algunos críticos dudan de que por sí sola pueda resolver el problema. Se sabe poco sobre el modo en que una enorme cantidad de contaminantes afectaría a la temperatura del planeta. Puede que los beneficios fueran solo a corto plazo, o que los efectos secundarios resultaran ser peores que el problema inicial. Por ejemplo, después de la erupción del monte Pinatubo se produjo una repentina y drástica reducción de las precipitaciones; si el experimento saliera mal, podría ocasionar sequías generalizadas. Las estimaciones del coste ponen de manifiesto que se necesitarían 100 millones de dólares para llevar a cabo pruebas de campo. Dado que el efecto de los aerosoles de sulfato es temporal, la inyección regular de grandes cantidades de esta sustancia en la atmósfera costaría un mínimo de 8.000 millones de dólares anuales.
- **Crear floraciones o *blooms* de algas**. Otra sugerencia es verter productos químicos ferruginosos en los océanos. Estos nutrientes minerales potenciarían el crecimiento de las algas en los océanos, lo cual a su vez aumentaría la cantidad de dióxido de carbono que es absorbido por las algas. Sin embargo, Planktos, una empresa con sede en California, anunció que tomaría unilateralmente la iniciativa particular de fertilizar parte del Atlántico Sur con hierro, para intentar potenciar las floraciones de plancton que absorberían el dióxido de carbono contenido en el aire. Los países adheridos a la Convención de Londres, que regula los vertidos marinos, emitieron un comunicado «expresando su preocupación» por esta iniciativa[13]. Asimismo, un grupo de la ONU hizo un llamamiento pidiendo una moratoria temporal para este tipo de experimentos. El experimento en cuestión terminó cuando Planktos se quedó sin fondos.

- **Captura y almacenamiento de carbono**. Otra posibilidad es utilizar el llamado secuestro (captura y almacenamiento) de carbono, un proceso mediante el cual el dióxido de carbono emitido por las centrales termoeléctricas alimentadas con carbón se licua y se separa del medio ambiente, siendo en algunos casos sepultado bajo tierra. Aunque esto en principio podría funcionar, se trata de un proceso muy caro, y no consigue retirar todo el dióxido de carbono que ya ha sido emitido a la atmósfera. En 2009, unos ingenieros estaban monitorizando minuciosamente la primera prueba importante de secuestro de carbono. La enorme central eléctrica Mountaineer, construida en 1980 en Virginia Occidental, fue reajustada para retirar el dióxido de carbono del medio ambiente, convirtiéndose así en la primera planta generadora de electricidad mediante carbón de Estados Unidos que experimenta con el proceso de captura y almacenamiento. El gas licuado se inyectará a casi 2.400 metros bajo tierra, concretamente en un estrato de dolomita[14]. El líquido formará finalmente una masa de entre 9 y 12 metros de altura y cientos de metros de longitud. La empresa propietaria de la planta, American Electric Power, planea inyectar anualmente 100.000 toneladas de dióxido de carbono durante un período de entre dos y cinco años. Esto es solo el 1,5 por ciento de la emisión anual de la planta, pero finalmente el sistema podría capturar hasta un 90 por ciento. El coste inicial es de unos 73 millones de dólares, pero, si tiene éxito, este modelo podría propagarse rápidamente a otras instalaciones, por ejemplo, a cuatro gigantescas centrales de carbón que generan 6.000 megavatios de energía (tantos que la zona se conoce como Megawatt Valley). Pero hay grandes interrogantes: no está claro si el dióxido de carbono acabará emigrando, o si este gas se combinará con el agua, produciendo quizá anhídrido carbónico, que puede envenenar las aguas subterráneas. No obstante, si el proyecto tiene éxito, formará parte de una combinación de tecnologías que se utilizarán para hacer frente al calentamiento global.
- **Ingeniería genética**. Otra propuesta es usar la ingeniería genética para crear específicamente formas de vida que puedan absorber grandes cantidades de dióxido de carbono. Un promotor entusiasta de esta idea es J. Craig Venter, que obtuvo fama y fortuna como pionero de unas técnicas de alta velocidad que llevaron con éxito a realizar la secuencia del genoma humano años antes de lo previsto en el calendario. «Consideramos el genoma como el equipo lógico (*software*) o incluso el sistema operativo de la célula», dice Venter[15]. Su objetivo es reescribir ese equipo lógico, de modo que los microbios puedan ser modificados genéticamente o incluso construidos casi a partir de la nada, de modo que absorban el dióxido de carbono de las centrales termoeléctricas de carbón y lo conviertan en sustancias útiles, como el gas natural. Observa que «en nuestro planeta hay ya miles, quizá millones de

organismos que saben cómo hacer esto». El truco consiste en modificarlos de forma que puedan aumentar su producción y también cultivarse en una central energética de carbón. «Creemos que este campo tiene un potencial tremendo para sustituir a la industria petroquímica, quizá dentro de una década», dice en tono optimista.

El físico Freeman Dyson, que trabaja en Princeton, ha abogado por otra posibilidad distinta en la misma línea: crear mediante la ingeniería genética una variedad de árboles que sean expertos en absorber el dióxido de carbono. Afirmó que quizá bastaría con un billón de esos árboles para controlar todo el dióxido de carbono del aire. En su publicación «Can We Control the Carbon Dioxide in the Atmosphere?» abogaba por crear un «banco de carbono[16][*]» mediante «árboles de crecimiento rápido» para regular los niveles de dióxido de carbono.

Sin embargo, como sucede con cualquier plan para la utilización de la ingeniería genética a gran escala, hay que tener cuidado con los efectos colaterales. No se puede modificar una forma de vida de la misma manera que modificamos un coche defectuoso o incompleto. Una vez liberada en el medio ambiente, esa forma de vida que ha sido modificada genéticamente puede producir efectos imprevistos en otras formas de vida, especialmente si desplaza especies vegetales locales y perturba el equilibrio de la cadena alimentaria.

Lamentablemente, entre los políticos ha habido una evidente falta de interés por financiar cualquiera de estos planes. Sin embargo, algún día el calentamiento global llegará a ser tan terrible y dañino que los políticos se verán obligados a poner en práctica algunos de ellos.

El período crítico serán las próximas décadas. Para mediados de siglo estaríamos en la era del hidrógeno, en la que una combinación de energía de la fusión, energía solar y energías renovables nos situaría en una economía mucho menos dependiente del consumo de combustibles fósiles. Una combinación de fuerzas del mercado y adelantos en la tecnología del hidrógeno nos daría una solución a largo plazo para el calentamiento global. El período de peligro es ahora, antes de que llegue una economía del hidrógeno. A corto plazo, los combustibles fósiles siguen siendo el modo más barato de generar energía y, por lo tanto, el calentamiento global seguirá constituyendo un peligro durante varias décadas.

LA ENERGÍA DE LA FUSIÓN

A mediados de siglo surgirá una nueva opción que cambiará totalmente el panorama: la fusión. Para entonces, esta sería la más viable de todas las posibilidades técnicas, y

quizá la que nos diera una solución permanente para el problema. Mientras la energía de la fisión se basa en la escisión del átomo de uranio, creando así energía (y al mismo tiempo una gran cantidad de residuos radiactivos), la energía de la fusión se basa en la unión de átomos de hidrógeno con gran cantidad de calor, con lo que se libera mucha más energía (produciendo muy pocos residuos).

A diferencia de la energía de la fisión, la de la fusión libera la energía nuclear del Sol. La fuente de energía del universo está enterrada en las profundidades del átomo de hidrógeno. La energía de la fusión ilumina el Sol y los cielos. Es el secreto de las estrellas. Quien logre dominar la energía de la fusión liberará una energía ilimitada y eterna. Además, el combustible que requieren estas plantas de fusión procede del agua de mar ordinaria. Con el mismo peso de combustible, la fusión libera 10 millones de veces más energía que la gasolina. Un vaso de agua de unos 225 gramos equivale a la energía contenida en 500.000 barriles de petróleo[17].

La fusión (no fisión) es el modo preferido por la naturaleza para dotar de energía al universo. En la formación de las estrellas, una bola de gas rica en hidrógeno se comprime gradualmente por la acción de la gravedad hasta que empieza a calentarse hasta alcanzar temperaturas elevadísimas. Cuando el gas llega más o menos a unos 50 millones de grados centígrados (la cifra varía dependiendo de las condiciones específicas), los núcleos de hidrógeno contenidos en el gas chocan los unos con los otros, hasta que se fusionan para formar helio. Durante el proceso se liberan grandes cantidades de energía, que hacen que el gas entre en ignición. (Por decirlo con mayor precisión, la compresión ha de cumplir lo que se llama el criterio de Lawson, según el cual se ha de comprimir el gas hidrógeno de una cierta densidad a cierta temperatura durante cierto tiempo. Si se cumplen estas tres condiciones de densidad, temperatura y tiempo, se produce una reacción de fusión, ya se trate de una bomba de hidrógeno, una estrella o una fusión dentro de un reactor).

Así pues, esta es la clave: calentar y comprimir el gas hidrógeno hasta que los núcleos se fusionan, liberando unas cantidades cósmicas de energía.

Sin embargo, los intentos llevados a cabo hasta ahora para controlar esta energía cósmica han fracasado. Es endiabladamente difícil calentar el gas hidrógeno a una temperatura de decenas de millones de grados hasta que los protones se fusionan para formar el gas helio y liberar grandes cantidades de energía.

Además, la opinión pública es escéptica con respecto a este asunto, ya que cada veinte años los científicos afirman que la energía de fusión es para dentro de veinte años. Pero, tras décadas de declaraciones excesivamente optimistas, los físicos están cada vez más convencidos de que la energía de fusión finalmente está al llegar, quizá para el año 2030. En algún momento, hacia mediados de siglo, podremos ver plantas de fusión salpicando el paisaje.

La opinión pública tiene todo el derecho a ser escéptica con respecto a la fusión nuclear, por todos los engaños, fraudes y fracasos que ha presenciado en el pasado. En 1951, cuando Estados Unidos y la Unión Soviética estaban enzarzados en el

frenesí de la guerra fría y se dedicaban a desarrollar febrilmente la primera bomba de hidrógeno, el presidente de Argentina, Juan Domingo Perón, anunció a bombo y platillo y con un amplio despliegue en los medios de comunicación que unos científicos de su país habían realizado un gran avance en el control de la energía solar. El asunto desencadenó una tormenta publicitaria. Parecía imposible de creer, pero fue portada del *New York Times*. Perón se jactaba de que Argentina había logrado un importante avance científico allí donde las superpotencias habían fracasado. Un desconocido científico de habla alemana, Ronald Richter, había convencido a Perón para que financiara su «termotrón», que prometía energía ilimitada y gloria eterna para Argentina.

La comunidad científica estadounidense, que todavía estaba pugnando por resolver el problema de la fusión en una feroz carrera para adelantarse a Rusia en la fabricación de la bomba H, declaró que la afirmación de Perón no tenía sentido. El científico nuclear Ralph Lapp dijo: «Ya sé cuál es el otro material que están utilizando los argentinos. Se llama camelo[18]».

La prensa se apresuró a bautizar el invento como bomba de camelo. Al científico nuclear David Lilienthal se le preguntó si había la «más mínima posibilidad» de que los argentinos pudieran tener razón. Lilienthal respondió lacónicamente: «Ni eso[19]».

Bajo una enorme presión, Perón se mantuvo firme, alegando que las superpotencias sentían envidia porque Argentina se les había adelantado. El año siguiente llegó por fin el momento de la verdad, cuando los representantes de Perón visitaron el laboratorio de Richter. Con las críticas lloviéndole por todos lados, Richter actuaba de una forma cada vez más errática y extraña. Cuando llegaron los inspectores, voló la puerta del laboratorio utilizando para ello bombonas de oxígeno y luego garabateó en un papel las palabras «energía atómica». Ordenó que se inyectara pólvora en el reactor. El veredicto fue que probablemente estaba loco. Cuando los inspectores colocaron un trozo de radio junto a los «contadores de radiación» de Richter, no sucedió nada, por lo que quedó claro que su equipo era fraudulento. Más tarde, Richter fue detenido.

Pero el caso más famoso fue el de Stanley Pons y Martin Fleischmann, dos químicos muy respetados de la Universidad de Utah que en 1989 declararon dominar la «fusión fría», es decir, la fusión a temperatura ambiente. Afirmaron haber sumergido en agua un metal llamado paladio, que luego, de algún modo, como por arte de magia, comprimió los átomos de hidrógeno hasta que estos se fusionaron produciendo helio y liberando la energía solar en un dispositivo de mesa.

La conmoción fue inmediata. Prácticamente toda la prensa mundial publicó este descubrimiento en portada. De la noche a la mañana, los periodistas se pusieron a hablar del final de la crisis energética y anunciaron el comienzo de una nueva era de energía ilimitada. Un auténtico delirio sacudió a los medios de comunicación de todo el mundo. El estado de Utah aprobó inmediatamente una dotación de 5 millones de dólares para crear un Instituto Nacional para la Fusión Fría. Incluso los fabricantes de

automóviles japoneses se pusieron a donar millones de dólares para promover la investigación en este nuevo y candente campo. Empezaron a surgir admiradores entusiastas que seguían todo lo relacionado con la fusión fría.

A diferencia de Richter, Pons y Fleischmann gozaban de gran consideración en la comunidad científica y compartían gustosamente sus resultados con otros investigadores. Expusieron sin secretismos su equipo y sus datos para que todo el mundo pudiera verlos.

Sin embargo, las cosas se complicaron. Como el aparato era tan sencillo, hubo por todo el mundo grupos de científicos que intentaron reproducir aquellos asombrosos resultados. Desafortunadamente, la mayoría de esos grupos fracasaron en su intento de lograr cualquier producción neta de energía, llegando a la conclusión de que la fusión fría era un callejón sin salida. No obstante, el cuento siguió estando de actualidad porque hubo declaraciones esporádicas de que ciertos grupos habían conseguido reproducir el experimento con éxito.

Finalmente, la comunidad científica intervino. Unos físicos analizaron la ecuación de Pons y Fleischmann, y la encontraron deficiente. En primer lugar, si sus afirmaciones hubieran sido correctas, desde el recipiente del agua se habría radiado una abrasadora ráfaga de neutrones que habría matado a Pons y Fleischmann. (En una reacción de fusión, dos núcleos de hidrógeno chocan y se fusionan, creando energía, un núcleo de helio y también un neutrón). Por lo tanto, el hecho de que Pons y Fleischmann siguieran vivos, significaba que el experimento no había funcionado. Si sus experimentos hubieran logrado la fusión fría, ellos estarían mortalmente afectados por las quemaduras de la radiación. En segundo lugar, es más que probable que Pons y Fleischmann hubieran descubierto una reacción química, y no una reacción termonuclear. Y, por último, los físicos llegaron a la conclusión de que el paladio no podía conseguir que los átomos de hidrógeno se unieran tan estrechamente como para hacer que el hidrógeno se fusionara convirtiéndose en helio. Esto violaría las leyes de la teoría cuántica.

Pero la controversia no se ha dado por zanjada hoy en día. Aún hay declaraciones ocasionales afirmando que alguien ha conseguido la fusión fría. El problema es que nadie ha sido capaz de alcanzar de manera fiable la fusión fría cuando se le ha pedido que lo hiciera. Después de todo, ¿para qué sirve fabricar un motor de automóvil, si solo funciona ocasionalmente? La ciencia se basa siempre en resultados reproducibles, comprobables y falsificables que funcionan siempre.

LA FUSIÓN CALIENTE

Las ventajas de la energía de fusión son, sin embargo, tan grandes que muchos científicos han prestado atención a sus cantos de sirena.

Por ejemplo, la fusión genera una contaminación mínima. Es relativamente limpia y es el procedimiento que utiliza la naturaleza para suministrar energía al universo. Un producto residual de la fusión es el gas helio, que tiene realmente un valor comercial. Otro es el acero radiactivo de la cámara de fusión, que finalmente ha de ser enterrado. Es levemente peligroso durante unas pocas décadas. Sin embargo, una planta de fusión produce una cantidad insignificante de residuos nucleares en comparación con una central estándar de fisión de uranio (que produce al año treinta toneladas de residuos altamente radiactivos cuya vida media oscila entre miles y decenas de millones de años).

Además, las plantas de fusión no pueden sufrir la catastrófica fundición del núcleo del reactor. Las centrales de fisión de uranio, precisamente porque contienen toneladas de residuos altamente radiactivos en su núcleo, producen grandes cantidades de calor incluso después del apagado del reactor. Es este calor residual el que puede fundir el acero y entrar en las aguas subterráneas, generando una explosión de vapor y la pesadilla de un accidente como la hipotética catástrofe denominada síndrome de China.

Las plantas de fusión son inherentemente más seguras. Una «fundición del reactor en una planta de fusión» es una expresión contradictoria. Si tuviéramos que eliminar el campo magnético de un reactor de fusión, el plasma caliente golpearía las paredes de la cámara y el proceso de fusión se detendría inmediatamente. Por lo tanto, una planta de fusión, en vez de sufrir una reacción en cadena incontrolable, se apaga de manera espontánea en caso de accidente.

«Incluso si se derribara la planta, el nivel de radiación a un kilómetro de la valla sería tan bajo que no habría necesidad de proceder a la evacuación», afirma Farrokh Najmabadi, que dirige el Centro de Investigación de la Energía perteneciente a la Universidad de California en San Diego[20].

Aunque la energía de fusión producida de forma comercial tiene todas estas maravillosas ventajas, cabe mencionar un pequeño inconveniente: no existe. Nadie ha montado todavía una planta de fusión operativa.

Pero los físicos son prudentemente optimistas. «Hace una década, algunos científicos se preguntaban si la fusión era posible, incluso en el laboratorio[21]. Ahora sabemos que la fusión funcionará. La duda es si resultará económicamente rentable», dice David E. Baldwin, de General Atomics, que supervisa uno de los mayores reactores de fusión de Estados Unidos, el DIIID.

NIF: LA FUSIÓN POR LÁSER

Todo esto podría experimentar un cambio radical durante los próximos años. Diversos planteamientos se están llevando a la práctica de manera simultánea y, tras décadas de puntos de partida equivocados, los físicos están convencidos de que se

conseguirá finalmente la fusión. En Francia se encuentra el Reactor Experimental Termonuclear Internacional (ITER), en el que participan como socios muchos países europeos, junto con Estados Unidos, Japón y otros. En Estados Unidos está en marcha la Instalación Nacional de Ignición (NIF).

Tuve oportunidad de visitar la instalación NIF de fusión por láser, y es algo colosal. Por su estrecha relación con las bombas de hidrógeno, el reactor de la NIF está emplazado en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, donde el ejército diseña ojivas de hidrógeno. Tuve que pasar muchos controles de seguridad antes de finalmente poder acceder a la instalación.

Pero, cuando llegué al reactor, viví una experiencia verdaderamente impresionante. Estoy acostumbrado a ver láseres en laboratorios universitarios (de hecho, uno de los más grandes laboratorios de láser del estado de Nueva York se encuentra justo debajo de mi despacho de la Universidad de Nueva York), pero ver la instalación NIF fue una experiencia abrumadora. Ocupa un edificio de diez pisos del tamaño de tres campos de fútbol y tiene 192 rayos láser gigantescos que se disparan por un largo túnel. Es el mayor sistema de láser del mundo y produce sesenta veces más energía que cualquier otro anterior a él.

Cuando los rayos láser se disparan por aquel largo túnel, acaban chocando con un conjunto de espejos que enfocan cada rayo hacia un diminuto objetivo que tiene el tamaño de una cabeza de alfiler y está hecho de deuterio y tritio (dos isótopos del hidrógeno). Resulta increíble, pero 500 billones de vatios de energía láser se dirigen a una diminuta bola que apenas es visible a simple vista, y la abrasan hasta que la bolita alcanza una temperatura de 100 millones de grados, mucho más calor que en el centro del Sol. (La energía de este impulso colosal es equivalente a la producción de medio millón de centrales nucleares en un breve instante). La superficie de esta bolita microscópica se vaporiza rápidamente, lo cual libera una onda de choque que destroza la bolita y libera la energía de fusión.

La instalación se terminó en 2009 y actualmente está siendo sometida a pruebas. Si todo va bien, podrá ser la primera instalación que crea tanta energía como consume. Aunque esta instalación no está diseñada para la producción comercial de energía eléctrica, sí está diseñada para demostrar que unos rayos láser pueden focalizarse para calentar materiales ricos en hidrógeno y producir energía neta.

Hablé con uno de los directores de la instalación NIF, Edward Moses, sobre sus esperanzas y sus sueños en relación con este proyecto. Moses llevaba un casco en la cabeza y parecía más un trabajador de la construcción que un físico nuclear de élite, responsable del mayor laboratorio de láser del mundo. Reconoció que en el pasado se habían emprendido muchas iniciativas erróneas. Pero creía que esta era la buena: él y su equipo estaban a punto de conseguir un logro importante, algo que figuraría en los libros de historia, tras ser los primeros en captar pacíficamente la energía del Sol en la Tierra. Hablando con él, fui consciente de que algunos proyectos como la NIF cobran vida gracias a la pasión y la energía de aquellos que creen sinceramente en dichos

proyectos. Me dijo que soñaba con el día en que podría invitar al presidente de Estados Unidos a su laboratorio para anunciarle que algo histórico acababa de suceder.

Pero, al principio, la NIF tuvo un mal comienzo. (Han sucedido cosas extrañas, tales como que el anterior director adjunto de la NIF, E. Michael Campbell, fue obligado a dimitir en 1999, porque se descubrió que había mentido sobre la obtención de un doctorado en Princeton). Después, la fecha de terminación, fijada inicialmente para 2003, empezó a posponerse. Los costes subieron con rapidez, pasando de 1.000 a 4.000 millones de dólares. Se acabó por fin en marzo de 2009, con seis años de retraso.

Dicen que el demonio se esconde en los detalles. En la fusión de láser, por ejemplo, los 192 rayos láser tienen que incidir en la superficie de una bolita diminuta con una precisión extrema para que la bolita implosione uniformemente. Los rayos tienen que acertar en esta diminuta diana con un desfase no mayor de 30 billonésimas de segundo entre uno y otro. El más leve desalineamiento de los rayos láser o la más imperceptible irregularidad de la bolita significa que esta no se calentará de manera simétrica, con lo cual explotará hacia un lado, en vez de implosionar esféricamente.

Si la bolita tiene una irregularidad de más de 50 nanómetros (lo que viene a ser unos 150 átomos), no implosionará simétricamente[22]. (Es como intentar lanzar una pelota de béisbol a la zona de bateo desde una distancia de 500 kilómetros). Por lo tanto, el alineamiento de los rayos láser y la uniformidad de la bolita son los problemas principales a los que se enfrenta la fusión por láser.

Aparte de la NIF, hay otro proyecto: la Unión Europea está preparando su propia versión de fusión por láser. El reactor se instalará en la HiPER (High Power Laser Energy Research Facility), y es más pequeño, pero quizá más eficiente, que la NIF. La construcción de la HiPER comenzará en 2011.

Las esperanzas de muchos están puestas en la NIF. Sin embargo, si la fusión por láser no funciona como se espera, hay otra propuesta aún más avanzada para lograr una fusión controlada: meter el Sol en una botella.

ITER: LA FUSIÓN EN UN CAMPO MAGNÉTICO

Pero hay otro diseño que se está realizando en Francia. El Reactor Experimental Termonuclear Internacional (ITER) utiliza unos enormes campos magnéticos para contener el gas hidrógeno caliente. En vez de usar rayos láser para implosionar al instante una diminuta bolita de material rico en hidrógeno, el ITER utiliza un campo magnético para comprimir lentamente el gas. La instalación se parece mucho a un enorme rosco hueco (forma toroidal) que está hecho de acero y tiene unas bobinas magnéticas rodeando el hueco del rosco. El campo magnético impide que el hidrógeno escape de esa cámara de forma toroidal. Entonces se envía una corriente

eléctrica que pasa a través del gas, calentándolo. La combinación de comprimir el gas mediante el campo magnético y enviar una corriente eléctrica que lo invade hace que el gas se caliente a muchos millones de grados.

La idea de utilizar una «botella magnética» para producir la fusión no es nueva. De hecho, se remonta a la década de 1950. Pero ¿por qué tanto tiempo, tantos retrasos, para comercializar la energía de fusión?

El problema es que el campo magnético ha de ajustarse con precisión para que el gas se comprima uniformemente sin formar bultos por ninguna parte, ni adoptar formas irregulares. Imaginemos que intentamos comprimir un balón con las manos, de tal forma que la compresión sea uniforme. Veremos que el balón se abomba en las zonas donde no aprietan nuestras manos, haciendo que sea casi imposible comprimirlo de manera uniforme. Por lo tanto, el problema es la inestabilidad; no un problema de física, sino de ingeniería.

Esto resulta extraño si pensamos que las estrellas comprimen fácilmente el gas hidrógeno para crear los billones de astros que vemos en nuestro universo. Parece como si la naturaleza creara estrellas en los cielos sin realizar esfuerzo alguno; entonces, ¿por qué no podemos hacer lo mismo en la Tierra? La respuesta se basa en una sencilla pero profunda diferencia entre la gravedad y el electromagnetismo.

La gravedad, como explicó Newton, es estrictamente una fuerza de atracción. Por lo tanto, en una estrella la gravedad comprime el gas hidrógeno de manera uniforme, dándole forma de esfera. (Esta es la razón por la que las estrellas y los planetas son esféricos, y no cúbicos o triangulares). Pero las cargas eléctricas son de dos tipos: positivas y negativas. Si formamos una bola de cargas negativas, estas se repelerán unas a otras y se dispersarán en todas las direcciones. Sin embargo, si reunimos cargas positivas y negativas, obtendremos lo que se llama un «dipolo», con un complicado conjunto de líneas de campo eléctrico que parecen una tela de araña. De manera similar, los campos magnéticos forman un dipolo; por consiguiente, comprimir un gas caliente de manera uniforme dentro de una cámara con forma de rosco es una tarea endiabladamente difícil. De hecho, se necesita un superordenador para dibujar los campos eléctricos y magnéticos que emanan de una simple configuración de electrones.

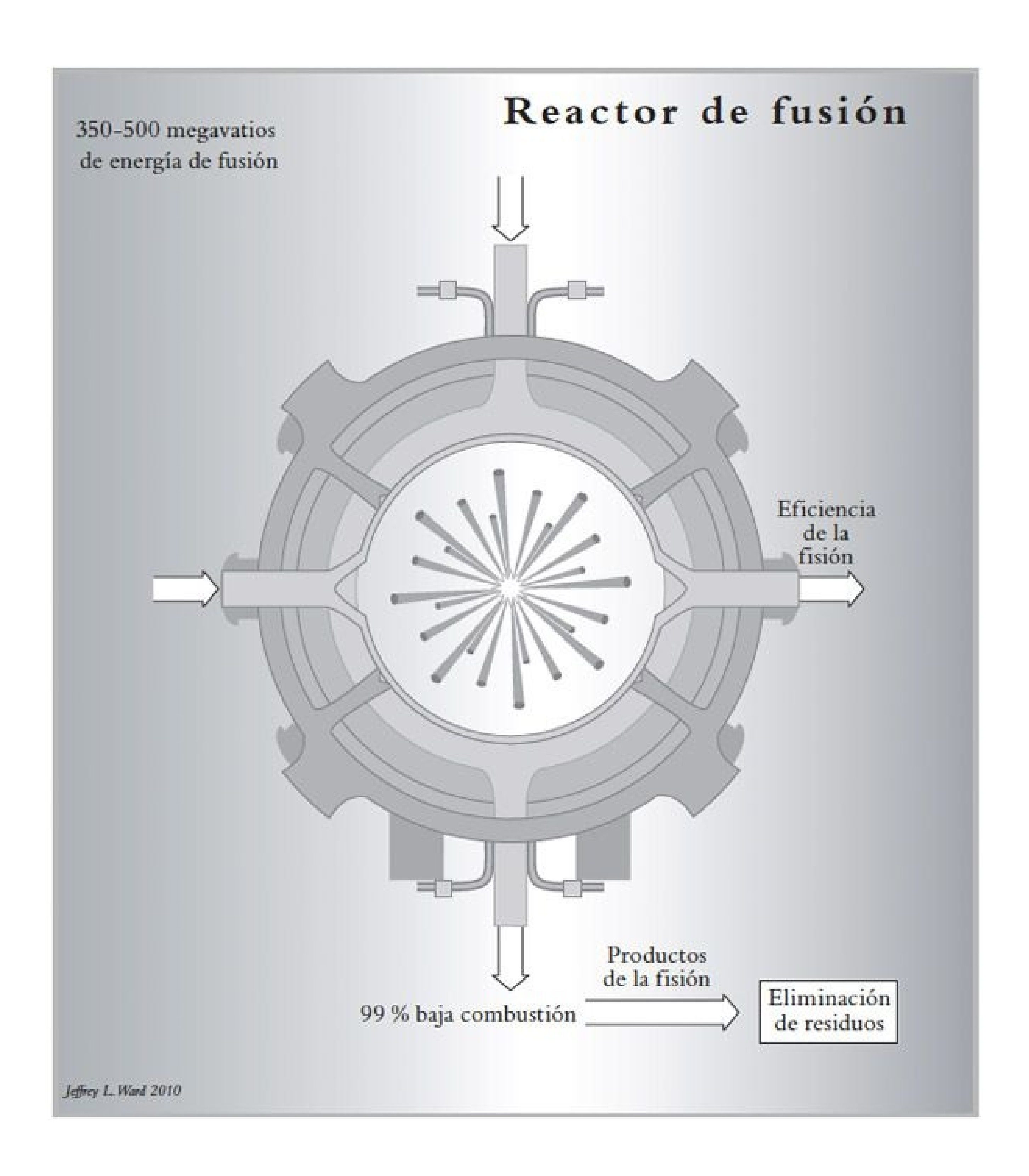
Todo se reduce a esto. La gravedad es una fuerza de atracción y puede comprimir un gas de manera uniforme formando una esfera. Las estrellas pueden formarse sin esfuerzo. Pero el electromagnetismo se compone de fuerzas de atracción y fuerzas de repulsión, por lo que los gases pueden formar bultos de maneras complejas cuando son comprimidos, haciendo que la fusión controlada resulte excesivamente difícil. Este es el problema fundamental que ha atormentado a los físicos durante cincuenta años.

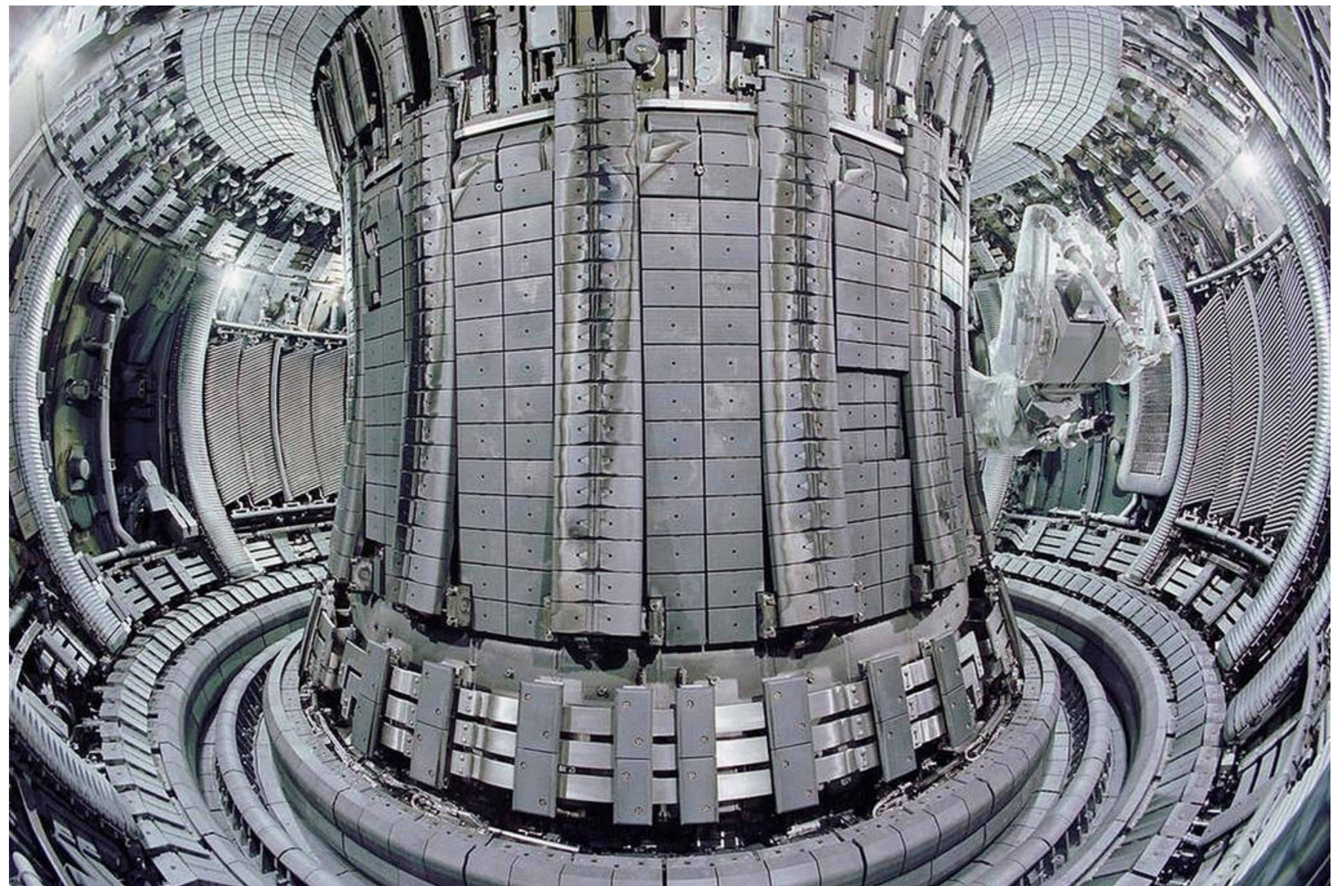
Hasta ahora. Actualmente, los físicos afirman que el ITER ha resuelto por fin los fallos que surgían del problema de la estabilidad en el confinamiento magnético.

El ITER es uno de los más ambiciosos proyectos científicos internacionales que se han abordado en todos los tiempos. El núcleo de la instalación es una cámara de metal con forma de rosco. En total, su peso será de 23.000 toneladas, lo cual supera ampliamente el peso de la torre Eiffel, que solo pesa 7.300 toneladas[23].

Sus componentes son tan pesados que las carreteras por las que se transportará el equipo han de ser modificadas para tal efecto. Un largo convoy de camiones llevará los componentes, el más pesado de los cuales tiene un peso de 900 toneladas, y el más alto una altura de cuatro pisos. El edificio que albergará el ITER tendrá una altura de diecinueve pisos y se asentará sobre una enorme plataforma del tamaño de sesenta campos de fútbol. Se prevé que cueste 10.000 millones de euros, un coste que compartirán siete socios (la Unión Europea, Estados Unidos, China, la India, Japón, Corea y Rusia).

Cuando por fin se ponga en funcionamiento, calentará el hidrógeno a 132 millones de grados Celsius, superando ampliamente los 13 millones de grados Celsius que se registran en el centro del Sol. Si todo va bien, esta instalación generará 500 megavatios de energía, que es diez veces la cantidad de energía que entra inicialmente en el reactor. (El récord actual de producción de energía de fusión está en 16 megavatios, que es lo que genera el reactor europeo JET [Joint European Torus], ubicado en el Culham Science Centre, en Oxfordshire, Reino Unido). Tras algunos retrasos, la fecha de puesta en marcha se ha fijado para 2019.


Reactor de fusión
350-500 megavatios
de energía de fusión
Eficiencia
de la
fisión
Productos
de la fisión
99 % baja combustión
Eliminación
de residuos
Jeffrey L. Ward 2010



Dos tipos de fusión. Arriba, unos rayos láser comprimen una diminuta bola de material rico en hidrógeno. Abajo, unos campos magnéticos comprimen un gas que contiene hidrógeno. A mediados de siglo, nuestra civilización podrá obtener toda la energía que necesite utilizando la fusión.

El ITER no es todavía más que un proyecto científico[24]. No está diseñado para producir energía comercial. Sin embargo, los físicos están ya poniendo los cimientos para el paso siguiente, que es llevar la energía de fusión al mercado. Farrokh Najmabadi, director de un grupo de trabajo que estudia proyectos comerciales para plantas de fusión, ha propuesto la ARIESAT, una instalación de menor tamaño que el ITER, que produciría mil millones de vatios a razón de, aproximadamente, 5 centavos por kilovatio/hora, lo que la haría competitiva en relación con los combustibles fósiles. Pero incluso Najmabadi, que es optimista con respecto a la fusión, reconoce que esta no estará lista para una comercialización extensa hasta mediados de siglo.

Otro proyecto comercial es el reactor de fusión DEMO. Mientras el ITER está diseñado para producir 500 megavatios durante un mínimo de 500 segundos, el DEMO se diseñará para producir energía de forma continuada. El DEMO añade un paso más, del que carece el ITER. Cuando se produce la fusión, se forma un neutrón suplementario que escapa rápidamente de la cámara. No obstante, es posible rodear la cámara con un recubrimiento especial llamado «la manta» que está diseñado específicamente para absorber la energía de este neutrón. Entonces la manta se calienta. Dentro de ella hay unas tuberías por las que circula agua, y esta se pone a hervir. Este vapor se envía a las palas de una turbina que genera electricidad.

Si todo va bien, el DEMO se pondrá en marcha en 2033. Este reactor será un 15 por ciento más grande que el ITER. El DEMO producirá una cantidad de energía que

es veinticinco veces la que consume. En total, se espera que el DEMO produzca 2.000 megavatios de energía, lo cual lo haría comparable a una central eléctrica convencional. Si la planta del reactor DEMO tiene éxito, podría contribuir a una rápida comercialización de esta tecnología.

Pero quedan muchas incertidumbres. El reactor ITER tiene ya asegurada la financiación que se precisa para su construcción. Sin embargo, por lo que respecta al DEMO, como este reactor está todavía en fase de planificación, es previsible que se produzcan retrasos.

Los científicos que trabajan en la fusión creen que por fin se ve la luz al final del túnel. Tras décadas de declaraciones exageradas y fracasos, piensan que la fusión está ya al alcance de la mano. No solo uno, sino dos diseños (la NIF y el ITER) pueden finalmente traer la electricidad de fusión a nuestra sala de estar. Sin embargo, dado que ni la NIF ni el ITER están todavía generando energía comercial de fusión, cabe aún que suceda lo inesperado, como una fusión con un dispositivo de mesa o una fusión en burbujas.

LA FUSIÓN MEDIANTE UN DISPOSITIVO DE MESA

Como lo que está en juego es tan importante, vale la pena reconocer también la posibilidad de resolver el problema desde un planteamiento completamente diferente e inesperado. Dado que la fusión es un proceso tan claramente definido, se han formulado varias propuestas que quedan al margen de la tónica habitual de inversión a gran escala, pero que, sin embargo, tienen su mérito. En particular, algunas de estas ideas podrían lograr algún día la fusión con dispositivos de mesa.

En la escena final de la película *Regreso al futuro*, se ve a Doc Brown, el científico loco, pugnando por conseguir combustible para su máquina del tiempo construida a partir de un automóvil DeLorean. En vez de echarle gasolina, el científico rebusca en contenedores de basura para conseguir pieles de plátano y desperdicios, que luego vierte en un pequeño bote llamado Mr. Fusion.

¿Será posible que, quizá dentro de cien años, algún proyecto excepcional pueda reducir las enormes instalaciones del tamaño de campos de fútbol a algo del tamaño de una cafetera, como sucede en la película?

Una posibilidad seria para realizar la fusión mediante un dispositivo de mesa es lo que se llama sonoluminiscencia, que utiliza la compresión total y repentina de burbujas para provocar unas temperaturas abrasadoras. Esto se llama a veces fusión sónica o fusión en burbujas. Este curioso efecto se conoce desde hace décadas, y se remonta a 1934, cuando unos científicos de la Universidad de Colonia estaban experimentando con ultrasonidos y película fotográfica, con la idea de acelerar el proceso de revelado. Observaron unos puntos diminutos en la película, causados por unos destellos de luz que generaban los ultrasonidos al producir burbujas en el fluido.

Posteriormente, los nazis observaron que las burbujas emitidas por las palas de sus propulsores a menudo brillaban como brasas, lo cual indicaba que, de algún modo, se estaban generando altas temperaturas en el interior de las mismas.

Más tarde se demostró que las burbujas brillaban como brasas porque implosionaban de manera uniforme, comprimiendo así el aire que había en su interior hasta que este cogía una temperatura extremadamente elevada. Como hemos visto anteriormente, la fusión caliente tiene el problema de la compresión irregular del hidrógeno, ya sea porque los rayos láser que han de chocar contra la bolita de combustible están mal alineados, o porque se comprime el gas de manera no uniforme. Cuando la burbuja se encoge, el movimiento de las moléculas es tan veloz que la presión del aire en el interior de la burbuja se vuelve uniforme rápidamente a lo largo de las paredes de la misma. En principio, si se puede implosionar una burbuja en unas condiciones tan perfectas, la fusión será un hecho.

Los experimentos de sonoluminiscencia han logrado producir temperaturas de decenas de miles de grados. Utilizando gases nobles, se puede aumentar la intensidad de la luz emitida por las burbujas. Pero existe cierta controversia sobre si pueden alcanzarse unas temperaturas suficientemente altas para que se produzca la fusión nuclear. La controversia se originó a partir de la obra de Rusi Taleyarkhan, que trabajó en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge. Taleyarkhan declaró en 2002 que podía lograr la fusión con su aparato sónico. Afirmó que al realizar su experimento había detectado neutrones, una clara señal de que se estaba produciendo la fusión nuclear. Sin embargo, tras años de trabajos realizados por otros investigadores que no han logrado reproducir el experimento de Taleyarkhan, este resultado, por el momento, se ha puesto en duda.

Pero otro comodín es la máquina de fusión de Philo Farnsworth, el nunca reconocido coinventor de la televisión. Cuando era niño, a Farnsworth le surgió la idea de la televisión pensando en cómo ara sus campos un labrador, surco a surco. Incluso esbozó los detalles de su prototipo a los catorce años de edad. Fue el primero que transfirió esta idea a un aparato completamente electrónico capaz de recibir en una pantalla unas imágenes en movimiento. Desafortunadamente, no pudo financiar su excepcional invento y se vio atrapado en largas y sucias peleas con la RCA por la titularidad de la patente. Sus batallas legales llegaron incluso a volverle loco, y se sometió voluntariamente a un reconocimiento en un hospital psiquiátrico. Su trabajo pionero sobre la televisión pasó prácticamente inadvertido.

Más tarde, Farnsworth centró su atención en el fusor, un pequeño dispositivo de mesa que podía realmente generar neutrones mediante la fusión. Este dispositivo estaba formado por dos grandes esferas, una dentro de la otra, cada una hecha de una malla de cable. La malla exterior está cargada con carga positiva, mientras que la interior tiene carga negativa, de tal modo que los protones inyectados entre ambas son repelidos por la malla exterior y atraídos por la interior. Entonces esos protones

chocan con una pequeña bola rica en hidrógeno que está en el centro, dando lugar a la fusión y a una ráfaga de neutrones.

Este diseño es tan sencillo que incluso estudiantes de bachillerato han hecho lo que Richter, Pons y Fleischmann no lograron hacer: generar neutrones. Sin embargo, es muy improbable que este dispositivo pueda producir algún día energía utilizable. El número de protones que se consigue acelerar es extremadamente pequeño, por lo que la cantidad de energía producida por este aparato es muy pequeña.

De hecho, también es posible producir la fusión sobre una mesa utilizando un colisionador de átomos o un acelerador de partículas estándar. Un colisionador de átomos es más complicado que un fusor, pero se puede utilizar también para acelerar protones de modo que estos choquen con un objetivo rico en hidrógeno y produzcan la fusión. Pero, una vez más, el número de protones que se fusionan es tan pequeño que el aparato no resulta práctico. Por consiguiente, tanto el fusor como el colisionador de átomos pueden lograr la fusión, pero resultan simplemente demasiado ineficientes, y sus rayos son demasiado finos para producir una energía utilizable.

Teniendo en cuenta los enormes intereses que están en juego, no hay duda de que otros científicos e ingenieros emprendedores tendrán su oportunidad de convertir sus artilugios básicos en el próximo megainvento.

EL FUTURO LEJANO (DESDE 2070 HASTA 2100)

LA ERA DEL MAGNETISMO

El siglo pasado fue la era de la electricidad. El hecho de que los electrones se manipulen con tanta facilidad ha abierto las puertas a unas tecnologías totalmente nuevas que han hecho posibles la radio, la televisión, los ordenadores, los láseres, las exploraciones mediante IRM, etcétera. Pero en algún momento de este siglo es probable que los físicos descubran su Santo Grial: los superconductores a temperatura ambiente. Esto nos hará entrar en una era totalmente nueva, la era del magnetismo.

Imaginemos que circulamos en un coche magnético, flotando sobre el suelo y viajando a varios cientos de kilómetros por hora, casi sin consumir combustible. Imaginemos que los trenes e incluso las personas viajen por el aire, flotando sobre campos magnéticos.

A veces olvidamos que la mayor parte de la gasolina que utilizamos en nuestros coches se consume para superar el rozamiento. En principio, casi no hace falta energía para viajar de San Francisco a la ciudad de Nueva York. La razón por la que este viaje consume cientos de dólares de gasolina es que hay que superar la fricción de las ruedas con la carretera y la fricción del aire. Sin embargo, si de algún modo

pudiéramos cubrir con una capa de hielo toda la carretera desde San Francisco a Nueva York, recorreríamos la mayor parte del trayecto de manera gratuita. De manera similar, nuestras sondas espaciales pueden navegar más allá de Plutón con solo unos pocos litros de combustible porque se deslizan por el vacío del espacio. Del mismo modo, un coche magnético flotaría sobre el suelo; no hay más que soplar y el coche empieza a moverse.

La clave para conseguir esta tecnología está en los superconductores. Desde 1911 se sabe que el mercurio, cuando se enfría a 4 grados Kelvin (–269 °C), por encima del cero absoluto, pierde toda resistencia eléctrica. Esto significa que los cables superconductores no pierden energía, ya que carecen de resistencia. (La razón es que los electrones que se mueven por el cable pierden energía cuando chocan con los átomos. Pero cerca del cero absoluto, estos átomos se encuentran casi en reposo, por lo que los electrones pueden deslizarse fácilmente entre ellos sin perder energía).

Estos superconductores poseen propiedades extrañas pero maravillosas. Sin embargo, tienen una gran desventaja: hay que enfriarlos hasta casi el cero absoluto, y para eso se utiliza hidrógeno líquido, que es muy caro.

En consecuencia, los físicos quedaron conmocionados en 1986, cuando se anunció el descubrimiento de una nueva clase de superconductores que no necesitaban ser enfriados hasta estas temperaturas tan increíblemente bajas. A diferencia de otros materiales anteriores, como el mercurio o el plomo, estos superconductores eran cerámicos, y previamente se había pensado que no eran candidatos adecuados para ser superconductores, y que solo se convertían en tales a 92 grados Kelvin (–181 °C), por encima del cero absoluto. Sorprendentemente, se vio que se convertían en superconductores a una temperatura que se consideraba teóricamente imposible.

Por ahora, el récord mundial de estos nuevos conductores cerámicos está en 138 grados Kelvin (–135 °C) sobre el cero absoluto. Esto es importante, ya que el nitrógeno líquido (que es tan barato como la leche) se forma a 77 °K (–196 °C) y, por lo tanto, puede utilizarse para enfriar estos superconductores cerámicos. Este hecho, por sí solo, ha rebajado radicalmente los costes de los superconductores. Por lo tanto, estos superconductores de alta temperatura tienen aplicaciones prácticas inmediatas.

Pero los superconductores cerámicos no han hecho más que aguzar el apetito de los físicos. Son un paso de gigante en la dirección correcta, pero todavía no es suficiente. En primer lugar, aunque el nitrógeno líquido es relativamente barato, hay que tener una instalación de refrigeración para enfriar el nitrógeno. En segundo lugar, es difícil modelar estas cerámicas para obtener cables. En tercer lugar, los físicos están todavía desconcertados por la naturaleza de esas cerámicas. Después de varias décadas, los físicos no están muy seguros de cómo funcionan. La teoría cuántica de estas cerámicas es demasiado complicada para resolverla en el momento actual, por lo que nadie sabe por qué estos materiales se convierten en superconductores. Los

físicos están desorientados. Un premio Nobel está esperando al individuo emprendedor que pueda explicar estos superconductores de alta temperatura.

Ahora bien, cualquier físico conoce el tremendo impacto que tendría un superconductor a temperatura ambiente. Podría poner en marcha otra revolución industrial. Los superconductores a temperatura ambiente no precisarían un equipo de refrigeración, por lo que podrían crear campos magnéticos permanentes dotados de una energía enorme.

Por ejemplo, si fluye electricidad dentro de un bucle de cobre, su energía se disipa en una fracción de segundo a causa de la resistencia del cable. Sin embargo, algunos experimentos han demostrado que la electricidad contenida en un bucle superconductor permanece constante durante años. La evidencia experimental señala que las corrientes que circulan por una bobina superconductora tienen un tiempo de vida de 100.000 años. Algunas teorías sostienen que el límite máximo para una de estas corrientes eléctricas que circulan por una bobina superconductora es el tiempo de vida del propio universo.

Como mínimo, estos superconductores podrían reducir la pérdida que se produce en los cables eléctricos de alto voltaje, reduciendo así el coste de la electricidad. Una de las razones por las que una central eléctrica tiene que estar tan cerca de una ciudad es que se producen pérdidas en sus líneas de transmisión. Esta es la razón por la que las centrales nucleares están tan cerca de las ciudades, con el consiguiente riesgo para la salud, y asimismo la razón de que las plantas eólicas no puedan colocarse en las zonas donde hay un máximo de viento.

Hasta el 30 por ciento de la electricidad generada por una planta eléctrica puede perderse en la transmisión. Los cables superconductores a temperatura ambiente podrían cambiar todo esto, proporcionando así un ahorro considerable en los costes y la contaminación. Esto podría tener también un profundo impacto en el calentamiento global. Dado que la producción mundial de dióxido de carbono está estrechamente ligada al consumo de energía, y dado que la mayor parte de la energía se gasta para superar la fricción, la era del magnetismo podría reducir de manera permanente el consumo de energía y la producción de dióxido de carbono.

EL COCHE Y EL TREN MAGNÉTICOS

Sin aportación suplementaria de energía, los superconductores a temperatura ambiente podrían producir superimanes capaces de levantar trenes y coches de modo que estos floten por encima del suelo.

Una simple demostración de esto puede realizarse en cualquier laboratorio. Yo mismo lo he hecho varias veces para BBCTV y Science Channel. Es posible encargar un pequeño trozo de superconductor cerámico de alta temperatura a una empresa de suministros científicos. Se trata de una cerámica gris y dura cuyo tamaño es más o

menos de dos centímetros y medio. Luego se puede comprar algo de nitrógeno líquido a una empresa de productos lácteos. Se coloca la cerámica en una fuente de plástico y se vierte sobre ella suavemente el nitrógeno. Este empieza a hervir con furia golpeando la cerámica. Se espera hasta que el nitrógeno deja de hervir y luego se coloca un pequeño imán encima de la cerámica. Como por arte de magia, el imán flota en el aire. Si le damos un golpecito al imán, este se pone a girar por sí solo. En esa pequeña fuente de plástico podemos estar viendo un futuro de transporte de energía por todo el mundo.

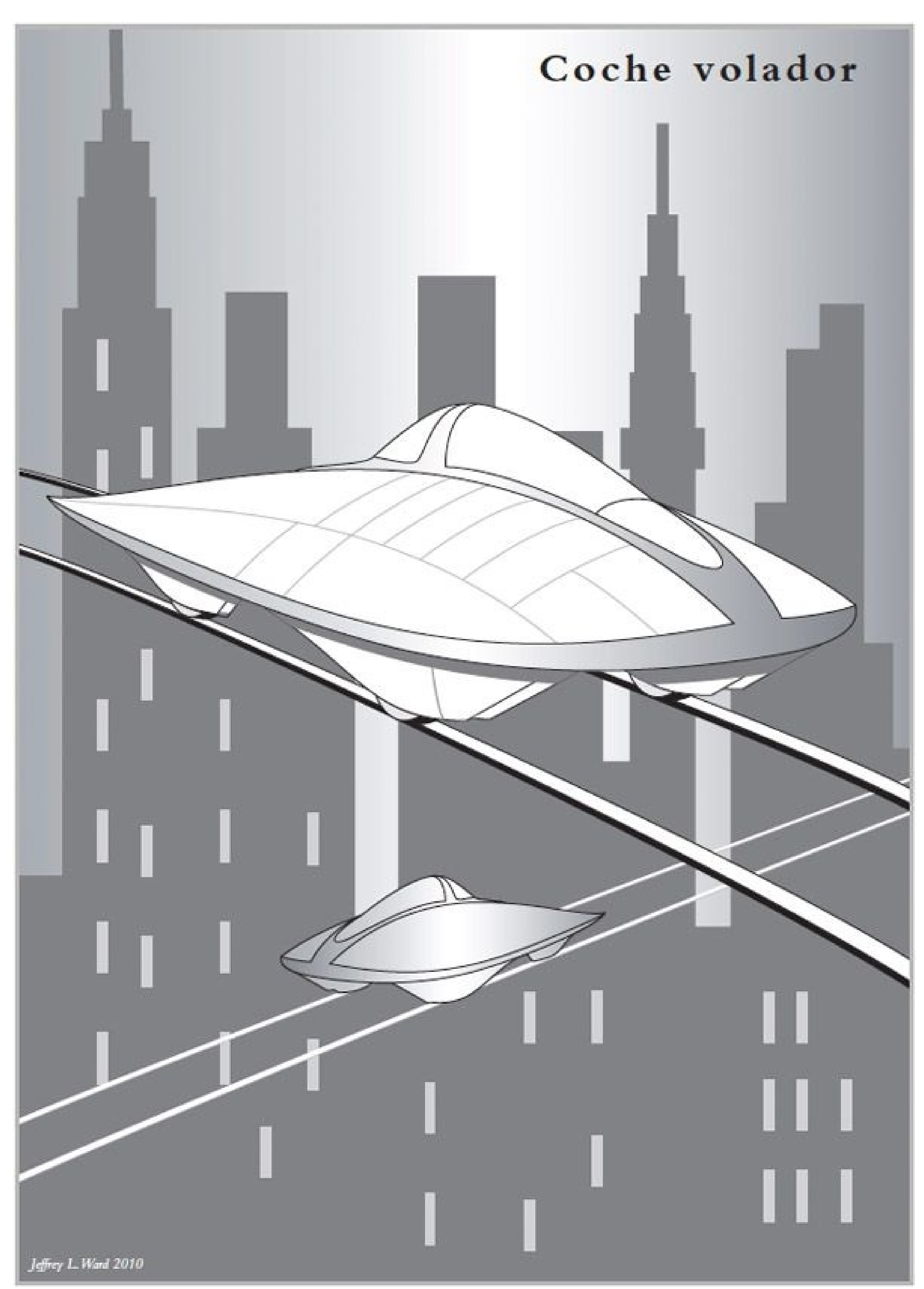
La razón por la que el imán flota es muy sencilla. Las líneas magnéticas de fuerza no pueden penetrar en un superconductor. A esto se le llama efecto Meissner. (Cuando se aplica un campo magnético a un superconductor, se forma una pequeña corriente eléctrica sobre su superficie y se cancela, de modo que el campo magnético es expelido del superconductor). Si se coloca el imán en la parte superior de la cerámica, sus líneas de campo se agrupan, ya que no pueden pasar a través de la cerámica. Esto crea un colchón de líneas de campo magnéticas que chocan unas con otras, empujando así el imán fuera de la cerámica y haciéndolo flotar.

Los superconductores a temperatura ambiente anuncian también una era de los superconductores. Como ya hemos visto, los aparatos de IRM son extremadamente útiles, pero requieren unos grandes campos magnéticos. Los superconductores a temperatura ambiente permitirán que la ciencia cree enormes campos magnéticos con poca inversión económica. Así, en el futuro se podrán miniaturizar los aparatos de IRM. Ya pueden fabricarse estos aparatos con una altura de unos treinta centímetros, utilizando campos magnéticos no uniformes. Con los superconductores a temperatura ambiente se podrán reducir al tamaño de un botón.

En la película *Regreso al futuro III*, Michael J. Fox aparece montado en un «aeropatín deslizador», un monopatín que flota en el aire. Tras el estreno de la película, los comercios se vieron desbordados por las llamadas de niños que querían comprar el aeropatín. Desgraciadamente, estos artilugios no existen, pero podrían fabricarse con los superconductores a temperatura ambiente.

TRENES Y COCHES DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA (MAGLEV) [*]

Una sencilla aplicación de los superconductores a temperatura ambiente es revolucionar el transporte introduciendo coches y trenes que floten sobre el suelo y, por lo tanto, puedan desplazarse sin fricción alguna.



Los superconductores a temperatura ambiente nos proporcionarán algún día coches y trenes voladores. Estos transportes flotarán sin fricción alguna sobre raíles o sobre pavimentos superconductores.

Supongamos que vamos en un coche que utiliza superconductores a temperatura ambiente. Las carreteras estarían hechas de superconductores en vez de asfalto. El coche estaría provisto de un imán permanente o generaría un campo magnético mediante un superconductor propio. El vehículo flotaría. Para poner el coche en movimiento bastaría incluso con usar aire comprimido. Una vez en marcha, prácticamente se deslizaría sin cesar, si la carretera fuera plana. Se necesitaría un motor eléctrico o un propulsor de aire comprimido, pero solo para vencer la fricción del aire, que sería el único obstáculo al que se enfrentaría el coche.

Incluso sin superconductores a temperatura ambiente, varios países han fabricado trenes de levitación magnética (maglev) que se deslizan flotando sobre unos raíles que contienen imanes. Como los polos norte de unos imanes repelen a los polos norte de otros, los imanes están dispuestos de tal modo que la parte inferior del tren contiene imanes que le permiten flotar sobre la vía.

Alemania, Japón y China son líderes en esta tecnología. Los trenes maglev han llegado incluso a batir algunos récords mundiales. El primer tren maglev comercial fue el tren lanzadera de baja velocidad que circulaba entre el Aeropuerto Internacional y la Estación Internacional de Ferrocarril en Birmingham en 1984. La velocidad más alta que ha alcanzado un tren maglev es de 581 kilómetros por hora, registrada en Japón en el tren MLX01 en 2003. (Los aviones a reacción pueden volar más rápido, en parte porque a grandes alturas hay menos resistencia del aire. Dado que un tren maglev flota en el aire, la mayor parte de su pérdida de energía se debe a la fricción del aire. Sin embargo, si un tren maglev funcionara en una cámara de vacío, podría viajar a unos 6.450 kilómetros por hora). Desafortunadamente, los costes económicos de los trenes maglev han impedido que proliferaran por todo el mundo. Los superconductores a temperatura ambiente podrían cambiar la situación. Además, sería algo que revitalizaría el sistema ferroviario en Estados Unidos, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero de los aviones. Se estima que un 2 por ciento de los gases de efecto invernadero procede de los motores a reacción, por lo que los trenes maglev reducirían esa cantidad.

ENERGÍA DEL CIELO

A finales de siglo se abre otra posibilidad para la producción de energía: la energía del espacio. A esta energía se la llama energía solar espacial (SSP: *space solar power*) y se obtendría enviando cientos de satélites espaciales que orbiten la Tierra, absorban radiación solar y envíen esa energía a la Tierra en forma de radiación de microondas. Estos satélites estarían situados a unos 35.500 kilómetros de la Tierra y allí se convertirían en geoestacionarios, girando alrededor del planeta a la misma velocidad que este gira sobre su eje. Dado que en el espacio hay ocho veces más luz solar que en la superficie terrestre, esta técnica representa una posibilidad real.

Actualmente, el obstáculo principal para captar la SSP es su coste, sobre todo el de lanzar esos colectores espaciales. No hay en las leyes de la física nada que impida recoger energía directamente del Sol, pero los problemas de ingeniería y de costes son enormes. Sin embargo, a finales de este siglo se habrán encontrado maneras de reducir el coste de los viajes espaciales, por lo que estos satélites espaciales serán asequibles, como veremos en el capítulo 6.

La primera propuesta seria para explotar la energía solar espacial se hizo en 1968, cuando Peter Glaser, presidente de la Sociedad Internacional de Energía Solar, propuso enviar satélites del tamaño de una ciudad moderna que dirigieran la energía hacia la Tierra. En 1979, unos científicos de la NASA examinaron en profundidad esta propuesta y estimaron que el coste ascendería a varios cientos de miles de millones de dólares, con lo que el proyecto quedó descartado para siempre.

Ahora bien, dados los constantes avances realizados en el ámbito de la tecnología espacial, la NASA siguió financiando estudios de SSP a pequeña escala entre 1995 y 2003. Sus partidarios sostienen que es solo cuestión de tiempo convertir en realidad la tecnología y hacer razonables los costes de la SSP. «La SSP ofrece una fuente de electricidad a escala global, verdaderamente sostenible y libre de emisiones contaminantes», dice Martin Hoffert[25], un físico que trabajó en la Universidad de Nueva York.

Son enormes los problemas, reales e imaginarios, que se enfrentan a un proyecto tan ambicioso como este. Algunos lo temen porque la radiación de energía procedente del espacio podría llegar accidentalmente a una zona poblada, produciendo una cantidad enorme de víctimas. Pero este temor es exagerado. Si se calcula la radiación procedente del espacio que incide actualmente sobre la Tierra, se ve que es demasiado pequeña para ocasionar problemas de salud. Por lo tanto, las visiones de un endiablado satélite espacial que envía radiaciones mortales a nuestro planeta para freír ciudades enteras no pasa de ser el argumento para una pesadilla hollywoodiense.

El escritor de ciencia ficción Ben Bova, en un artículo del *Washington Post* en 2009, expuso el desalentador presupuesto de un satélite de energía solar[26]. Calculaba que cada satélite generaría entre 5 y 10 gigavatios de energía, mucho más que una central térmica convencional de carbón, y el coste sería de entre 8 y 10 centavos de dólar por kilovatio/hora, lo cual lo haría competitivo. Cada uno de estos satélites sería enorme, de unos 1.600 metros de diámetro, y costaría alrededor de mil millones de dólares, aproximadamente el coste de una central nuclear.

Para impulsar esta tecnología, pidió al gobierno actual que creara un proyecto de prueba, lanzando un satélite que pudiera generar entre 10 y 100 megavatios. Hipotéticamente podría lanzarse al final de la segunda legislatura del presidente Obama, si se empezaba de inmediato a poner en práctica el plan.

Haciéndose eco de estas declaraciones, el gobierno japonés anunció una iniciativa importante. En 2009, el ministro de Comercio japonés dio a conocer un plan para

investigar la viabilidad de un sistema de satélites de energía espacial. Mitsubishi Electric y otras empresas japonesas se sumarán a un programa de 10.000 millones de dólares para lanzar al espacio una estación de energía solar que generará 1.000 megavatios de energía. Será enorme, con una superficie de aproximadamente 3,9 kilómetros cuadrados cubierta de células solares.

«Suena como unos dibujos animados de ciencia ficción, pero la generación de energía solar en el espacio puede ser una fuente de energía alternativa a medida que avance el siglo y los combustibles fósiles vayan desapareciendo», ha dicho Kensuke Kanekiyo, del Instituto de Economía Energética, una organización gubernamental dedicada a la investigación[27].

Dada la magnitud de este ambicioso proyecto, el gobierno japonés es cauto. Primero, un grupo de investigadores dedicará los próximos cuatro años a estudiar la viabilidad científica y económica del proyecto. Si este grupo le da luz verde, el Ministerio de Comercio japonés y la Agencia de Exploración Aeroespacial japonesa planean lanzar en 2015 un pequeño satélite para hacer pruebas con el envío de radiación energética desde el espacio exterior.

El mayor obstáculo probablemente no será científico, sino económico. Hiroshi Yoshida, de Excalibur KK, una empresa de consultoría espacial con sede en Tokio, advertía: «Estos gastos han de reducirse a una centésima parte de los presupuestos actuales[28]». Un problema es que estos satélites han de situarse en el espacio a una distancia de unos 35.500 kilómetros de la Tierra, es decir, han de estar mucho más lejos que los satélites que orbitan a menos de 500 kilómetros, por lo que las pérdidas en la transmisión podrían ser enormes.

Pero el problema principal es el coste de los cohetes impulsores. Es el mismo embudo que ha bloqueado los planes para regresar a la Luna y explorar Marte.

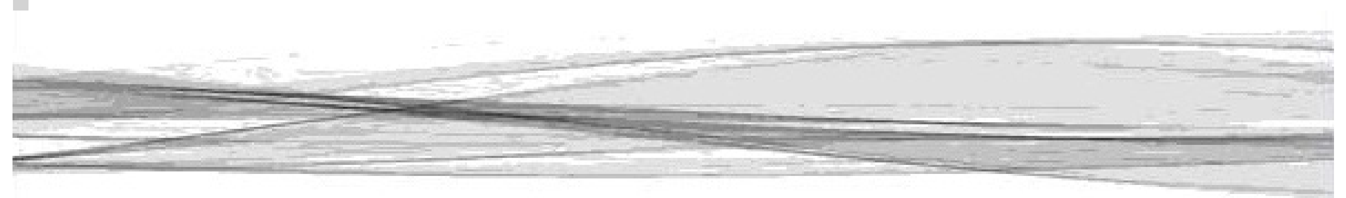
Salvo que los costes del lanzamiento de los cohetes desciendan significativamente, este plan morirá de muerte natural.

Desde una perspectiva optimista, el plan japonés podría ser ya operativo a mediados de siglo. Sin embargo, dados los problemas que plantean los cohetes impulsores, es más probable que el plan tenga que esperar hasta finales de siglo, cuando nuevas generaciones de cohetes hagan que descienda el coste. Entonces, si el problema principal de los satélites solares es el coste, la siguiente pregunta es: ¿Se puede reducir el coste de los viajes espaciales para que algún día podamos alcanzar las estrellas?

6

EL FUTURO DE LOS VIAJES ESPACIALES

Hacia las estrellas



Ya basta de vagar por las costas del océano cósmico. Por fin estamos preparados para embarcarnos y poner rumbo a las estrellas.

CARL SAGAN

LOS DIOSES de la mitología griega, subidos en potentes carros, paseaban por los campos celestiales del monte Olimpo. Los dioses escandinavos, a bordo de potentes naves vikingas, navegaban por los mares cósmicos hacia Asgard.

De manera similar, en 2100 la humanidad estará a punto de entrar en una nueva era de la exploración espacial: el objetivo será alcanzar las estrellas. A finales de siglo, las estrellas, que por la noche parecen tan tentadoramente cercanas y, sin embargo, están tan lejos, serán el centro de atención de los especialistas en naves espaciales.

Pero el camino hacia la construcción de naves espaciales estará lleno de obstáculos. La humanidad es como un ser cuyos brazos se alargan hasta tocar las estrellas, y cuyos pies están atascados en el barro. Por una parte, este siglo verá una nueva era de exploración espacial robótica, porque enviaremos satélites cuya misión será localizar en el espacio planetas gemelos de la Tierra, explorar las lunas de Júpiter, e incluso tomar imágenes del propio big bang. Sin embargo, la exploración del espacio exterior mediante naves tripuladas, que ha cautivado a muchas generaciones de soñadores y visionarios, será causa de algunos disgustos.

EL FUTURO CERCANO (DESDE EL PRESENTE HASTA 2030)

PLANETAS EXTRASOLARES

Uno de los logros más asombrosos del programa espacial ha sido la exploración robótica del espacio exterior, que ha ampliado considerablemente el horizonte de la

humanidad.

Lo prioritario en esas misiones robóticas será la búsqueda de planetas similares a la Tierra que puedan albergar vida, lo cual es el Santo Grial de la ciencia espacial. Hasta ahora, los telescopios situados en la superficie terrestre han identificado unos 500 planetas que orbitan en sistemas estelares lejanos, y se están descubriendo planetas con un promedio de uno nuevo cada una o dos semanas. Sin embargo, la gran decepción es que con nuestros instrumentos solo podemos identificar planetas gigantescos, del tamaño de Júpiter, en los que no puede darse la vida tal como la conocemos.

Para encontrar planetas, los astrónomos buscan pequeñas fluctuaciones en la trayectoria de una estrella. Se trata de sistemas solares que pueden compararse con una pesa de las usadas en los gimnasios: la pesa gira de tal modo que sus dos ruedas hacen movimientos de revolución de la una alrededor de la otra. Un extremo de la pesa sería la estrella, claramente visible mediante el telescopio, mientras que el otro extremo representa un planeta, del tamaño de Júpiter, que es unos mil millones de veces más oscuro. Cuando este planeta y su sol giran alrededor del centro de la pesa, los telescopios pueden ver claramente que la estrella se tambalea. Este método ha permitido identificar cientos de gigantes de gas en el espacio, pero es demasiado burdo para detectar la presencia de pequeños planetas parecidos a la Tierra.

El planeta más pequeño que han detectado los telescopios situados en la superficie terrestre se identificó en el año 2010, y su masa es entre 3 y 4 veces la de la Tierra. Lo notable de este descubrimiento es que esa «supertierra» es la primera que se encuentra situada en la zona habitable de su sol, es decir, a la distancia adecuada para tener agua en estado líquido.

Todo esto cambió con el lanzamiento del telescopio de la Misión Kepler en 2009 y del satélite COROT en 2006. Estas sondas espaciales buscan unas pequeñísimas fluctuaciones en la luz de las estrellas, producidas cuando un pequeño planeta se mueve frente a su estrella, bloqueando la luz de esta en una proporción minúscula. Escaneando minuciosamente miles de estrellas para buscar esas diminutas fluctuaciones, las sondas espaciales podrán detectar quizá cientos de planetas parecidos a la Tierra. Una vez identificados, esos planetas pueden analizarse rápidamente para ver si contienen agua líquida, que es quizá el bien más preciado de todo el espacio. El agua líquida es el disolvente universal, el recipiente en que probablemente surgió el primer ADN. Si en esos planetas hay océanos de agua líquida, eso podría modificar nuestra manera de entender la vida en el universo.

Los periodistas que van en busca del escándalo dicen «Sigue el dinero», pero los astrónomos que buscan vida en el espacio dicen «Sigue el agua».

A su vez, el satélite Kepler será sustituido por otros satélites más sensibles, como el Terrestrial Planet Finder. Aunque la fecha de lanzamiento de este satélite se ha pospuesto varias veces, sigue siendo el mejor candidato para mejorar los logros del Kepler. En primer lugar, dispondrá de un espejo cuatro veces mayor y cien veces más

sensible que el del telescopio espacial Hubble. En segundo lugar, tendrá sensores infrarrojos que podrán reducir la intensa radiación de una estrella hasta un millón de veces, consiguiendo así revelar la presencia del oscuro planeta que pueda estar girando en torno a ella. (Para conseguir esto, el satélite captará dos ondas de la radiación de la estrella y luego las combinará cuidadosamente, de modo que se anulen la una a la otra, eliminando así la presencia no deseada de la estrella).

De esta manera, en un futuro cercano, tendríamos una enciclopedia de varios miles de planetas, entre los que quizá haya unos pocos cientos muy similares a la Tierra en tamaño y composición. Esto, a su vez, aumentará el interés por enviar algún día una sonda a esos planetas lejanos. Se realizará un enorme esfuerzo para ver si esos hermanos gemelos de la Tierra tienen océanos de agua líquida y si se perciben algunas señales de radio emitidas por formas de vida inteligentes.

EL SATÉLITE EUROPA: FUERA DE LA ZONA DE HABITABILIDAD ESTELAR

Hay además otro objetivo tentador para las sondas que tenemos dentro de nuestro sistema solar: el satélite Europa. Durante décadas se creyó que, dentro del sistema solar, la vida únicamente podía existir en la «zona de habitabilidad estelar», una región que se extiende alrededor del Sol y donde los planetas no son demasiado calientes, ni demasiado fríos, para albergar vida. La Tierra tiene la suerte de disponer de agua líquida porque su órbita está a la distancia adecuada del Sol. El agua líquida herviría en un planeta como Mercurio, que se encuentra demasiado cerca del Sol, y se helaría en un planeta como Júpiter, que está demasiado lejos. Como el agua líquida es probablemente el fluido en el que el ADN y las proteínas se formaron por primera vez, durante mucho tiempo se creyó que dentro del sistema solar solo podía haber vida en la Tierra o, tal vez, en Marte.

Pero los astrónomos se equivocaban. Después de que la nave espacial *Voyager* surcara el espacio pasando por las lunas de Júpiter, se puso de manifiesto que había otro lugar en el que la vida podría florecer: bajo la capa de hielo que recubre las lunas de Júpiter. Europa, una de las lunas de Júpiter descubiertas por Galileo en 1610, pronto llamó la atención de los astrónomos. Aunque tiene su superficie cubierta permanentemente de hielo, bajo esa capa helada hay un océano líquido. Dado que el océano es mucho más profundo en Europa que en la Tierra, se calcula que el volumen total del océano de Europa es el doble del volumen de los océanos terrestres.

Hubo cierta sorpresa al constatar que en el sistema solar hay otra fuente de abundante energía diferente del Sol. Por debajo del hielo, la superficie de Europa se calienta continuamente a causa de las fuerzas mareales. Cuando Europa experimenta sacudidas en su órbita alrededor de Júpiter, la gravedad de este planeta de gran masa ejerce presiones sobre la luna en distintas direcciones, creando fricciones en zonas

profundas bajo la corteza. La fricción genera un calor que, a su vez, funde el hielo y crea un océano estable de agua líquida.

Este descubrimiento significa que quizá las lunas de esos lejanos gigantes de gas sean más interesantes que los propios planetas. (Probablemente, esta es la razón por la que James Cameron eligió una luna de un planeta del tamaño de Júpiter como escenario de su película *Avatar*, de 2009). La vida, que en otro tiempo se consideró un fenómeno bastante raro, podría florecer realmente en la negrura del espacio, en las lunas de los lejanos gigantes de gas. De repente se ha multiplicado el número de lugares donde la vida podría desarrollarse.

Como consecuencia de este notable descubrimiento, la EJSM (Europa Jupiter System Mission) tiene previsto su lanzamiento, de manera provisional, para el año 2020. Está diseñada para orbitar en torno a Europa y, si es posible, aterrizar en esta luna. Aparte de esto, algunos científicos han soñado con explorar Europa enviando allí aparatos aún más sofisticados. Han considerado toda una variedad de métodos para buscar vida bajo el hielo. Una posibilidad es la EICM (Europa Ice Clipper Mission[1]), que dejaría caer unas esferas sobre la superficie helada. El penacho y la nube de escombros que surgirían desde el lugar del impacto serían analizados detalladamente por una nave espacial que cruzaría la zona. Un programa aún más ambicioso es colocar bajo el hielo un submarino hidrobótico manejado por control remoto.

El interés que suscita Europa se ha visto también fomentado por nuevos descubrimientos bajo el océano aquí en la Tierra. Hasta la década de 1970, la mayoría de los científicos creían que el Sol era la única fuente de energía que hacía posible la vida. Sin embargo, en 1977 el submarino *Alvin* encontró pruebas de la existencia de nuevas formas de vida allí donde nadie antes había sospechado que existieran. Explorando la dorsal de las Galápagos, encontró gigantescos gusanos tubícolas, mejillones, crustáceos, almejas y otras formas de vida que utilizaban la energía térmica procedente de unas chimeneas volcánicas para sobrevivir. Donde hay energía, podría haber vida; y esas chimeneas volcánicas submarinas proporcionan una nueva fuente de energía en la oscuridad del fondo marino. De hecho, algunos científicos han sugerido que el primer ADN no se habría formado en alguna charca intermareal de las costas terrestres, sino en las profundidades submarinas cerca de una chimenea volcánica. Algunas de las formas más primitivas de ADN (y quizá las más antiguas) han sido encontradas en los fondos oceánicos. Si esto es así, quizá las chimeneas volcánicas que hay en el satélite Europa puedan proporcionar la energía necesaria para conseguir que de aquel suelo surja algo parecido al ADN.

Lo más que se puede hacer es especular sobre las formas de vida posibles que podrían formarse bajo el hielo de Europa. En caso de que existan, serán probablemente criaturas nadadoras que utilizan el sónar, en vez de la luz, para poder navegar, por lo que su visión del universo estará limitada a lo que es la vida bajo un «cielo» de hielo.

LISA: ANTES DEL BIG BANG

Otro satélite espacial que podría causar una gran sensación en el mundo del conocimiento científico es la antena espacial con interferómetro láser (LISA: Laser Interferometer Space Antenna), y lo mismo harán sus sucesores. Estas sondas pueden conseguir lo imposible: revelar lo que sucedió antes del big bang.

En la actualidad hemos conseguido ya medir la velocidad a la que las distantes galaxias se alejan de nosotros. (Esto se debe al efecto Doppler, fenómeno por el cual la luz se distorsiona cuando una estrella se aleja de nuestra posición o se acerca a la misma). Esta medida nos da la velocidad de expansión del universo. Entonces, «rebobinando la cinta», calculamos cuándo se produjo la explosión original. Esto es muy similar al procedimiento de analizar los fragmentos incandescentes procedentes de una explosión para determinar cuándo se produjo esta. Así se calculó que el big bang tuvo lugar hace 13.700 millones de años. Lo que, sin embargo, resulta frustrante es que el actual satélite espacial llamado sonda Wilkinson de anisotropía de microondas (WMAP: Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) solo ha podido retroceder en sus observaciones hasta un mínimo de 400.000 años después de la explosión inicial. Por consiguiente, nuestros satélites únicamente pueden decirnos que hubo una explosión, pero no por qué se produjo, ni qué fue lo que explotó, ni cuál fue la causa de todo aquello.

Esta es la razón por la que el proyecto LISA está generando tanta expectación. LISA medirá un tipo de radiación totalmente nuevo: las ondas gravitatorias producidas en el instante mismo del big bang.

Cada vez que se ha dominado una nueva forma de radiación, esto ha cambiado nuestra visión del mundo. Cuando los telescopios ópticos fueron utilizados por primera vez por Galileo para realizar el mapa de los planetas y las estrellas, estos aparatos iniciaron el desarrollo de la astronomía como ciencia. Cuando se perfeccionaron los radiotelescopios, poco después de la Segunda Guerra Mundial, estos revelaron un universo de agujeros negros y de estrellas que explotaban. Y ahora la tercera generación de telescopios, capaces de detectar ondas gravitatorias, puede inaugurar una visión aún más impresionante: el mundo de los agujeros negros que colisionan, dimensiones superiores e incluso un multiverso.

Provisionalmente se ha establecido la fecha de lanzamiento entre 2018 y 2020. LISA consta de tres satélites que forman un triángulo gigantesco de casi 5 millones de kilómetros de ancho, y están conectados mediante tres rayos láser. Será el mayor instrumento espacial que se ha puesto en órbita. Cualquier onda gravitatoria procedente del big bang que esté todavía reverberando por el universo sacudirá un poco los satélites. Esta perturbación modificará las trayectorias de los rayos láser, y entonces unos sensores registrarán la frecuencia y las características de la perturbación. De este modo, los científicos podrán remontarse a un intervalo de tiempo inferior a una billonésima de segundo después del big bang. (Según Einstein,

el espacio-tiempo es como un tejido que puede curvarse y estirarse. Si se produce una gran perturbación, como el choque de agujeros negros o el big bang, se forman unas ondulaciones que se desplazan por ese tejido. Dichas ondulaciones, u ondas gravitatorias, son demasiado pequeñas para ser detectadas por instrumentos ordinarios, pero LISA es suficientemente sensible y grande para detectar las vibraciones producidas por esas ondas gravitatorias).

Además, LISA no solo será capaz de detectar la radiación procedente de agujeros negros que colisionan, sino que podría también ser capaz de echar un vistazo a la era anterior al big bang, cosa que en otros tiempos se consideraba imposible.

En la actualidad hay varias teorías sobre la era previa al big bang que proceden de la teoría de cuerdas, que es mi especialidad. Una de las situaciones posibles es que nuestro universo sea una especie de burbuja enorme que se está expandiendo continuamente. Vivimos en la superficie de esa burbuja gigantesca, pegados a ella como los insectos al papel matamoscas. Pero nuestro universo de burbuja coexiste en un océano con otros universos burbuja, constituyendo así el multiverso de universos, como un baño de burbujas. Ocasionalmente, esas burbujas podrían colisionar entre sí (según lo que se ha llamado «teoría del big splat [gran plaf]») o podrían fisionarse en pequeñas burbujas y luego expandirse (proceso que recibe el nombre de «inflación eterna»). Cada una de estas teorías sobre la época anterior al big bang predice el modo en que el universo emitiría radiación gravitatoria momentos después de la explosión inicial. LISA puede medir la radiación gravitatoria emitida después del big bang y compararla con las diversas predicciones de la teoría de cuerdas. De este modo, LISA podría descartar o validar algunas de estas teorías.

Ahora bien, incluso en el caso de que LISA no fuera suficientemente sensible para llevar a cabo esta delicada tarea, quizá sí lo sea la próxima generación de detectores posteriores a LISA (tales como el Observador del Big Bang).

Si tienen éxito, estas sondas espaciales podrán responder a la pregunta que ha permanecido sin respuesta durante siglos: ¿De dónde procede inicialmente el universo? Así pues, es muy posible que, a corto plazo, el origen del big bang quede desvelado.

ENVÍO DE MISIONES TRIPULADAS AL ESPACIO

Mientras que las misiones robóticas continuarán abriendo nuevas perspectivas para la exploración espacial, las misiones tripuladas se enfrentarán a obstáculos y barreras mucho mayores. Esto se debe a que las misiones robóticas son baratas y versátiles en comparación con las misiones tripuladas; pueden explorar entornos peligrosos; no requieren el costoso mantenimiento de los seres vivos; y, lo más importante, no tienen que regresar.

Si nos remontamos a 1969, entonces parecía que nuestros astronautas estaban preparados para explorar el sistema solar. Neil Armstrong y Buzz Aldrin acababan de caminar por la superficie de la Luna, y la gente ya estaba soñando con ir a Marte o aún más lejos. Teníamos la sensación de estar ya en el umbral de las estrellas. Una nueva era amanecía para la humanidad.

Y luego este sueño se desmoronó.

Como ha escrito el autor de ciencia ficción Isaac Asimov, marcamos un gol, agarramos el balón y nos fuimos a casa. Hoy en día, los viejos cohetes propulsores Saturno están durmiendo en los museos o cubriéndose de óxido en los depósitos de chatarra. Se dejó que desapareciera toda una generación de científicos especializados en cohetes. El ímpetu de la carrera espacial fue decayendo poco a poco. Ahora mismo, solo encontramos referencias al famoso «paseo por la Luna» en polvorientos libros de historia.

¿Qué sucedió? Muchas cosas, como la guerra de Vietnam, el escándalo Watergate, etcétera. Pero, si vamos al fondo del asunto, todo se reduce a una sola palabra: costes.

A veces olvidamos que los viajes espaciales son caros, muy caros. Cuesta 10.000 dólares poner medio kilo de algo en una órbita cercana a la Tierra. Para hacernos una idea del coste de un viaje espacial, basta con imaginar a John Glenn hecho de oro macizo. Para alcanzar la Luna se necesitan unos 100.000 dólares por cada medio kilo de peso. Y llegar a Marte requeriría aproximadamente 1.000.000 de dólares por cada medio kilo (más o menos el peso de un individuo en diamantes).

Sin embargo, todo ello estaba compensado por la emoción y el drama de competir con los rusos. Las espectaculares hazañas espaciales de los valientes astronautas hacían que no se mirara el auténtico coste de la navegación espacial, ya que a los estados no les importaba pagar caro si estaba en juego el honor de la patria. Pero incluso las superpotencias son incapaces de mantener tales costes durante muchas décadas.

Lo triste es que han pasado más de 300 años desde que sir Isaac Newton formuló por primera vez las leyes del movimiento, y seguimos obstinados por un simple cálculo. Para poner un objeto en órbita cerca de la Tierra, hemos de lanzarlo a unos 30.000 kilómetros por hora. Y, para enviarlo a las profundidades del espacio, hemos de impulsarlo a unos 40.000 kilómetros por hora. (Para alcanzar esta cifra mágica de 40.000 kilómetros por hora, hemos de utilizar la tercera ley del movimiento de Newton: a cada acción le corresponde una reacción igual y de sentido contrario. Esto significa que el cohete puede avanzar rápidamente porque expele gases calientes en la dirección opuesta, del mismo modo que un globo vuela por la habitación cuando lo hemos inflado y lo soltamos de repente). Partiendo de las leyes de Newton, solo hay que dar un sencillo paso para calcular el coste de un viaje espacial. No hay ley alguna de la ingeniería o de la física que nos impida explorar el sistema solar; es solo cuestión de costes.

Para complicar aún más las cosas, el cohete ha de transportar su propio combustible, lo cual le añade peso. Los aeroplanos solucionan en parte este problema porque absorben oxígeno del aire exterior y lo queman luego en sus motores. Pero, como no hay aire en el espacio, el cohete ha de transportar sus propios depósitos de oxígeno e hidrógeno.

No es esta únicamente la razón por la que viajar por el espacio resulta tan caro; también es la razón por la que no tenemos cinturones cohete (o mochilas a reacción), ni coches voladores. Los escritores de ciencia ficción (no los auténticos científicos) idealizan el día en que todos nos pondremos un cinturón cohete e iremos volando al trabajo, o despegaremos con nuestro coche volador para hacer la excursión del domingo con nuestra familia. A mucha gente le desilusionaron los futuristas porque las predicciones de estos nunca llegaron a cumplirse. (Es la razón por la que existen numerosos artículos y libros con títulos tan cínicos como *¿Dónde está mi cinturón?*). Pero basta un rápido cálculo para averiguar el porqué. Los cinturones cohete ya existen; de hecho, los nazis los usaron brevemente durante la Segunda Guerra Mundial. Ahora bien, el peróxido de hidrógeno, el combustible corriente que se utiliza en los cinturones cohete, se consume rápido, por lo que un vuelo con uno de ellos puede durar solo unos pocos minutos. Además, los coches voladores que usan palas de helicóptero consumen una cantidad enorme de combustible, lo cual los hace demasiado caros para el ciudadano medio que se desplaza al trabajo desde su zona de residencia.

CANCELACIÓN DEL PROGRAMA LUNAR

Dado el enorme coste de la navegación espacial, actualmente el futuro de la exploración espacial tripulada está iniciando un proceso de transición. El anterior presidente, George W. Bush, presentó un plan claro y ambicioso para el programa espacial. En primer lugar, en 2010 se retiraría la lanzadera espacial y se sustituiría en 2015 por un nuevo sistema de naves espaciales llamado Constellation. En segundo lugar, los astronautas volverían a la Luna en 2020, estableciendo allí por fin una base permanente con personal trabajando en ella. En tercer lugar, esto prepararía el camino para una futura misión tripulada que iría a Marte.

Sin embargo, la situación económica de la navegación espacial ha cambiado significativamente desde entonces, sobre todo porque la gran recesión ha reducido los fondos para futuras misiones espaciales. El informe de la Comisión Augustine, entregado al presidente Barack Obama en 2009, concluía que el plan anterior era insostenible, dados los niveles de financiación actuales. En 2010, el presidente Obama aceptó los resultados del informe de la Comisión Augustine y canceló la lanzadera espacial y su reposición, que iba a establecer la base para volver a la Luna. A corto plazo, sin los cohetes necesarios para enviar a nuestros astronautas al espacio,

la NASA se verá obligada a confiar en los rusos. Entretanto, esto da una oportunidad a las empresas privadas para que creen los cohetes necesarios para continuar con el programa espacial de viajes tripulados. Cortando de manera drástica con el pasado, la NASA ya no fabricará los cohetes para el programa espacial de viajes tripulados. Los que lo han propuesto dicen que este plan marcará el comienzo de una nueva era de la navegación espacial en la que la empresa privada se implicará. Las voces críticas afirman que este plan convertirá a la NASA en «una agencia de viajes a ninguna parte».

ATERRIZAR EN UN ASTEROIDE

El informe Augustine establecía lo que en el propio informe se llamaba «el camino flexible», que contempla varios objetivos modestos que no requieren tanto combustible para las naves espaciales; por ejemplo, viajar a un asteroide cercano que esté flotando en el espacio, o viajar a las lunas de Marte. Se señalaba que dicho asteroide podía incluso no estar aún en nuestros mapas celestes; podría ser un asteroide errante que descubriéramos en un futuro cercano.

El problema, según el informe Augustine, es que el combustible para la misión de aterrizar en una luna y regresar de ella, o concretamente de Marte, tendría un coste prohibitivo. Sin embargo, dado que los asteroides y las lunas de Marte tienen campos gravitatorios muy débiles, esas misiones no requerirían tanto combustible. El informe Augustine mencionaba también la posibilidad de visitar los puntos de Lagrange, que son los lugares del espacio exterior donde el tirón gravitatorio de la Tierra y el de la Luna se equilibran y compensan mutuamente. (Estos puntos podrían servir como vertedero cósmico, y estar recogidos en ellos los antiguos escombros del sistema solar primitivo. Por lo tanto, si los astronautas los visitan, podrían hallar rocas interesantes cuyo origen se remonta a la formación del sistema Tierra-Luna).

Aterrizar en un asteroide sería ciertamente una misión de bajo coste, ya que los asteroides tienen unos campos gravitatorios muy débiles. (Esta es también la razón por la que los asteroides presentan formas irregulares, y no esféricas. En el universo hay grandes objetos, como las estrellas, los planetas y las lunas, que son esféricos porque la gravedad actúa uniformemente. Cualquier irregularidad existente en la forma de un planeta va desapareciendo gradualmente a medida que la gravedad comprime la corteza de dicho planeta. Pero el campo gravitatorio de un asteroide es tan débil que no puede comprimirlo hasta darle forma de esfera).

Una de las posibilidades que se vislumbran es el asteroide Apofis, que pasará temiblemente cerca en 2029. Apofis tiene una anchura máxima de unos 300 metros, que viene a ser el tamaño de una gran estadio de fútbol, y se acercará tanto a la Tierra que de hecho pasará por debajo de algunos de nuestros satélites. Dependiendo de cómo se distorsione su órbita al aproximarse tanto a nuestro planeta, podría regresar

oscilando hacia la Tierra en 2036, y hay una probabilidad muy pequeña (1 entre 100.000) de que choque con ella. Si esto sucediera, nos golpearía con la fuerza de 100.000 bombas de Hiroshima, lo cual es suficiente para destruir una zona tan extensa como Francia, llenándola de tormentas de fuego, ondas de choque y escombros llameantes. (Un objeto en comparación mucho más pequeño, probablemente del tamaño de un edificio de apartamentos, se estrelló en Tunguska, Siberia, en 1908, con la fuerza de unas 1.000 bombas de Hiroshima, haciendo desaparecer los bosques en una superficie de unos 2.600 kilómetros cuadrados, y generando una onda de choque que se percibió a miles de kilómetros de distancia. También creó una extraña luminosidad que se veía en Asia y Europa, de modo que en Londres la gente podía leer los periódicos por la noche sin encender las luces).

Visitar Apofis no agotará el presupuesto de la NASA, ya que el asteroide se acercará a la Tierra en cualquier caso, pero aterrizar en él podría ser un problema. Dada la debilidad de su campo gravitatorio, la nave en realidad se acoplaría a él en vez de aterrizar en el sentido tradicional del término. Además, es probable que el asteroide gire en torno a sí mismo de manera irregular, por lo que antes de aterrizar habrá que hacer unas mediciones muy precisas. Sería interesante comprobar en qué medida es sólido el asteroide. Algunos opinan que un asteroide sería un conjunto de rocas sueltas que se mantienen unidas con holgura a causa de la debilidad del campo gravitatorio. Otros piensan que puede ser sólido. Determinar la consistencia de un asteroide podría ser importante algún día, si hemos de usar armas atómicas para volarlo. El asteroide, en vez de quedar convertido en un fino polvo, podría romperse en varios trozos grandes. Si sucediera esto, el peligro llegaría a ser aún mayor que la amenaza inicial. Sería mejor idea sacar el asteroide de su ruta, dándole un buen empujón antes de que se acerque a la Tierra.

ATERRIZAR EN UNA LUNA DE MARTE

Aunque el informe Augustine no recomendaba una misión tripulada a Marte, una posibilidad realmente fascinante sería enviar astronautas a visitar Fobos y Deimos, dos lunas de Marte. Estas lunas son mucho más pequeñas que nuestra Luna, por lo que tienen un campo gravitatorio muy débil. Aterrizar en las lunas de Marte supone unas cuantas ventajas, aparte del ahorro en los costes.

1. En primer lugar, estas lunas podrían utilizarse como estaciones espaciales. Esa sería una manera de estudiar el planeta desde el espacio, sin visitarlo y, por lo tanto, gastando poco dinero.
2. Además, las lunas proporcionarían, al fin y al cabo, una vía fácil para acceder a Marte. Fobos se encuentra a menos de 10.000 kilómetros del centro de

Marte, por lo que desde allí se podría hacer un rápido viaje al planeta rojo en cuestión de horas.

3. Estas lunas tendrán probablemente cuevas que se podrían utilizar para albergar una base permanente con personal humano y protegerla contra meteoros y radiaciones. En particular, Fobos cuenta con el enorme cráter Stickney en una zona lateral, lo cual indica la posibilidad de que esta luna recibiera el choque de un meteoro gigantesco que casi la revienta. Sin embargo, la gravedad recuperó poco a poco los pedazos y reensambló la luna. Seguramente hay muchas cuevas y brechas generadas por aquella antigua colisión.

REGRESO A LA LUNA

El informe Augustine mencionaba también un programa lunar llamado Moon First, donde se preveía que regresaríamos a nuestro satélite, pero solo si se dispusiera de más financiación: al menos 30.000 millones de dólares a lo largo de diez años. Dado que esto es sumamente improbable, el programa lunar queda en efecto cancelado, al menos durante los próximos años.

La misión lunar previamente cancelada se llamaba programa Constellation y tenía varios componentes importantes. En primer lugar, estaba el cohete propulsor Ares, el primer cohete propulsor estadounidense importante desde que el viejo cohete Saturno se guardó con bolas de naftalina en la década de 1970. Sobre el Ares iba montado el módulo Orión, que podía transportar seis astronautas hasta la estación espacial o llevar cuatro astronautas a la Luna. A continuación, estaba el módulo de alunizaje Altair, que era el componente que iba a aterrizar realmente en la Luna.

La vieja lanzadera espacial, donde el cohete lanzadera estaba colocado al costado del cohete propulsor, tenía varios fallos de diseño, como la tendencia de este cohete a dispersar trozos de su aislamiento de espuma. Esto tuvo unas consecuencias desastrosas para la lanzadera espacial *Columbia*, que en 2003, cuando regresaba de su misión, se rompió en pedazos al entrar en la atmósfera, matando a siete valientes astronautas, porque un trozo de espuma del cohete propulsor golpeó a la lanzadera durante el despegue y le hizo un orificio en el ala. Al reentrar en la atmósfera, unos gases calientes penetraron en la cápsula del *Columbia*, matando a todos los que estaban dentro y haciendo que la nave estallara en pedazos. En el programa Constellation, como el módulo tripulado se sitúa directamente encima del cohete propulsor, no existiría este problema.

Del programa Constellation la prensa dijo que era «un programa Apolo con esteroides», porque se parecía mucho al programa del cohete lunar de la década de 1970. El propulsor Ares I iba a tener una altura de 99 metros, comparable con el cohete *Saturno V*, que medía 111 metros. Se suponía que iba a llevar el módulo Orión

al espacio, sustituyendo a la vieja lanzadera espacial. Sin embargo, para despegues con mucho peso, la NASA utilizaría el cohete *Ares V*, que tenía una altura de 116 metros y era capaz de llevar 207 toneladas de carga al espacio. El cohete *Ares V* sería la columna vertebral de cualquier misión que implicara viajar a la Luna o a Marte. (Aunque el *Ares* se ha cancelado, se habla de salvar quizá algunos de sus componentes para misiones futuras).

BASE LUNAR PERMANENTE

Aunque canceló el programa Constellation, el presidente Obama dejó abiertas varias opciones. El módulo Orión, que iba a llevar a nuestros astronautas de nuevo a la Luna, está siendo considerado actualmente como una cápsula de salvamento para la Estación Espacial Internacional. En algún momento del futuro, cuando la economía se recupere, puede que otro gobierno dirija de nuevo la mirada hacia la Luna, pensando incluso en una base lunar.

El proyecto de establecer una presencia permanente en la Luna se encuentra con muchos obstáculos. El primero son los micrometeoritos. Dado que la Luna no posee atmósfera, las rocas procedentes del espacio chocan con ella muy frecuentemente. Esto es evidente al observar su superficie, que está llena de marcas producidas por colisiones de meteoritos, algunas de las cuales se remontan a miles de millones de años.

Pude ver personalmente este peligro cuando hacía mi posgrado en la Universidad de California en Berkeley. Las rocas lunares traídas del espacio a principios de la década de 1970 causaban sensación en la comunidad científica. Fui invitado a un laboratorio donde se analizaban rocas lunares con microscopio. La roca que vi parecía corriente, ya que las rocas lunares se parecen mucho a las rocas terrestres, pero, al observarla al microscopio, me llevé una gran sorpresa. Vi unos diminutos cráteres meteóricos en la roca y, dentro de ellos, otros cráteres aún más pequeños. Nunca antes había visto unos cráteres dentro de otros, que, a su vez, también están dentro de otros más antiguos. Me di cuenta inmediatamente de que, al no existir una atmósfera, incluso la más diminuta partícula de polvo, si golpea a una persona a 65.000 kilómetros por hora, puede matarla o, al menos, atravesar el traje espacial. (Los científicos conocen el enorme daño producido por esos micrometeoritos porque pueden simular los impactos y, para estudiarlos, han creado en sus laboratorios unos enormes cañones que disparan unos perdigones metálicos imitando el efecto de los meteoritos).

Una posible solución es construir una base lunar subterránea. Dada la antigua actividad volcánica de la Luna, existe la posibilidad de que nuestros astronautas encuentren un tubo de lava, o tubo volcánico, que se extienda hacia las profundidades del interior del satélite. (Los tubos volcánicos son consecuencia de antiguos flujos de

lava que excavaron en su momento estructuras cavernosas y túneles en el subsuelo). En 2009, unos astrónomos descubrieron un tubo volcánico que era más o menos del tamaño de un rascacielos y que podría servir de base permanente en la Luna.

Esta cueva natural ofrecería a nuestros astronautas una protección barata contra la radiación de rayos cósmicos y las erupciones solares. Incluso un vuelo transcontinental de Nueva York a Los Ángeles nos expone a un radiación de un milirem por hora (el equivalente a someterse a una radiografía dental). En el caso de los astronautas, la radiación en la Luna podría ser tan intensa que tendrían que vivir necesariamente en bases subterráneas. Al no haber atmósfera, la mortal lluvia de erupciones solares y rayos cósmicos sería para los astronautas un peligro inmediato que les causaría envejecimiento prematuro e incluso cáncer.

También la ingravidez es un problema, especialmente en el caso de misiones espaciales de larga duración. Tuve ocasión de visitar el centro de entrenamiento de la NASA en Cleveland, Ohio, donde se les realizan pruebas exhaustivas a los astronautas. Observé que en una de aquellas pruebas el sujeto estaba suspendido mediante un arnés, de tal modo que su cuerpo estaba paralelo al suelo. Luego empezó a correr sobre una rueda de molino cuyas rodadas eran verticales. Al hacerle correr sobre la rueda de aquella manera, los científicos de la NASA simulaban la ingravidez, al tiempo que comprobaban la resistencia del individuo.

Cuando hablé con los médicos de la NASA, me enteré de que la ingravidez era más perjudicial que lo que había imaginado hasta entonces. Un médico me explicó que, después de varias décadas de someter a los astronautas estadounidenses y rusos a una ingravidez prolongada, se había comprobado que el cuerpo sufría cambios significativos: se producía un deterioro de los músculos, los huesos y el sistema cardiovascular. Nuestros cuerpos evolucionaron durante millones de años viviendo en el campo gravitatorio terrestre. Si nos colocan en un campo gravitatorio débil durante un largo período de tiempo, todos nuestros procesos biológicos se trastornan.

Unos astronautas rusos que han pasado alrededor de un año en el espacio han regresado tan débiles a la Tierra que apenas pueden gatear. Aunque hagan ejercicios a diario mientras están en el espacio, sus músculos se atrofian, sus huesos pierden calcio y su sistema cardiovascular empieza a debilitarse. Algunos tardan meses en recuperarse de estos trastornos, pero para otros el daño puede ser irreversible. Un viaje a Marte, que podría durar dos años, agotaría hasta tal punto las fuerzas de los astronautas que al llegar no podrían llevar a cabo su misión. (Una solución para evitar este problema es hacer que la nave espacial gire, porque esto crea una gravidez artificial dentro de dicha nave. La razón de esto es la misma que hace que el líquido no se derrame cuando hacemos girar un cubo de agua sobre nuestra cabeza. Sin embargo, este procedimiento es prohibitivamente caro, a causa de la pesada maquinaria que se necesita para hacer que la nave gire. Cada kilo de peso añadido añade unos veinte mil dólares al coste de la misión).

AGUA EN LA LUNA

El panorama ha cambiado significativamente con el descubrimiento de unos antiguos restos de hielo en la Luna[2], que probablemente fueron causados por antiguos impactos de cometas. En 2009, el satélite de detección y observación de cráteres de la NASA (LCROSS: Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) y su cohete propulsor Centauro se estrellaron en la zona del polo sur de la Luna. Chocaron a unos 9.000 kilómetros por hora, produciendo un penacho de casi 1.600 metros de altura y un cráter de unos 18 metros de diámetro. Aunque las audiencias televisivas sufrieron una decepción porque el impacto del LCROSS no produjo la explosión espectacular que se había pronosticado, los datos científicos obtenidos fueron de gran importancia. En el penacho se detectaron más de 100 litros de agua. Posteriormente, en 2010, los científicos dieron la impactante noticia de que un 5 por ciento del material liberado era vapor de agua, de lo que se deducía que la Luna era en realidad más húmeda que algunas zonas del desierto del Sahara.

Este hallazgo podía ser significativo, ya que sugería la posibilidad de que futuros astronautas utilizaran los depósitos subterráneos de hielo para obtener el combustible del cohete (extrayendo el hidrógeno del agua), para respirar (extrayendo el oxígeno), para hacerse un escudo protector (ya que el agua puede absorber radiaciones) y para beber, después de purificarla. Por lo tanto, este descubrimiento podría ahorrarle cientos de millones de dólares a cualquier misión cuyo objetivo fuera ir a la Luna.

El descubrimiento significa la posibilidad de que nuestros astronautas vivan fuera de la Tierra, recolectando hielo y minerales en la Luna para crear y abastecer una base permanente.

MEDIADOS DE SIGLO
(DESDE 2030 HASTA 2070)

UNA MISIÓN A MARTE

Durante su viaje a Florida en 2010 para anunciar la cancelación del programa lunar, el presidente Obama planteó la posibilidad de sustituir dicho programa por el proyecto de una misión a Marte. Declaró ser partidario de financiar un potente cohete propulsor, todavía sin especificar, que algún día podría enviar astronautas a las profundidades del espacio, más allá de la Luna. Especuló sobre la posibilidad de ver el día, quizá a mediados de la década de 2030, en que nuestros astronautas caminaran por la superficie de Marte. Algunos astronautas, como Buzz Aldrin, se han declarado partidarios entusiastas del plan de Obama, precisamente porque deja a un lado la

Luna. Aldrin me dijo en una ocasión que, como Estados Unidos ya ha estado en la Luna, la auténtica aventura es ir a Marte.

Entre todos los planetas del sistema solar, parece que solo Marte se asemeja a la Tierra lo suficiente como para albergar alguna forma de vida. (Mercurio, que está abrasado por el Sol, es probablemente demasiado inhóspito para que en él haya vida, tal como nosotros la conocemos. Y los gigantes de gas (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) son demasiado fríos para que en ellos pueda desarrollarse la vida. Venus es un planeta gemelo de la Tierra, pero un galopante efecto invernadero ha creado un infierno: las temperaturas ascienden a casi 500 °C; su atmósfera, formada en su mayor parte por dióxido de carbono, es cien veces más densa que la nuestra; y las lluvias son de ácido sulfúrico. Si camináramos por la superficie de Venus, nos sofocaríamos, nos aplastaríamos hasta morir, y nuestros restos serían incinerados por el calor y disueltos por el ácido sulfúrico).

Por otro lado, Marte fue en otro tiempo un planeta húmedo, como la Tierra, con océanos y cuencas fluviales que han desaparecido hace mucho tiempo. Actualmente es un desierto helado y vacío de vida. Quizá la vida microbiana floreciera alguna vez allí hace miles de millones de años, o tal vez siga viviendo en el subsuelo durante las primaveras templadas.

Una vez que nuestra nación haya aceptado en firme el compromiso de ir a Marte, se tardará entre veinte y treinta años en llevar a cabo esa misión de una manera real y completa. Pero ir a Marte será mucho más difícil que llegar a la Luna. A diferencia de la Luna, Marte representa un salto cuántico por lo que respecta a las dificultades. Se tarda solo tres días en llegar a la Luna, mientras que se tardaría entre seis meses y un año en llegar a Marte.

En julio de 2009, los científicos de la NASA hicieron una excelente descripción de lo que sería una misión a Marte desde un punto de vista realista. Los astronautas tardarían aproximadamente seis meses o más en llegar allí, luego pasarían dieciocho meses en ese planeta, y les llevaría otros seis meses el viaje de regreso.

En total, sería necesario enviar a Marte casi 700.000 kilos de equipamientos, más que la cantidad requerida para la estación espacial de 100.000 millones de dólares. Para ahorrar en agua y alimentos, los astronautas tendrían que purificar sus propios residuos y luego utilizarlos para fertilizar plantas durante el viaje y durante su estancia en Marte. Al no haber aire, ni terreno fértil, ni agua, todo tendría que ser llevado desde la Tierra. Sería imposible vivir con lo que hay allí, ya que en Marte no hay oxígeno, ni agua líquida, ni animales, ni plantas. La atmósfera es dióxido de carbono casi puro, con una presión atmosférica de tan solo el 1 por ciento de la que hay en la Tierra. Cualquier fisura en un traje espacial produciría una despresurización rápida y, como consecuencia, la muerte.

La misión sería tan compleja que habría que dividirla en varios pasos. Dado el coste tan elevado que tendría el transporte de combustible para el viaje de regreso a la Tierra, habría que enviar a Marte otro cohete por adelantado para reponer el

combustible de la nave espacial. (O bien, si pudieran extraerse del hielo de Marte cantidades suficientes de hidrógeno y oxígeno, estas podrían utilizarse también como combustible para la nave).

Una vez en Marte, los astronautas tardarían semanas en acostumbrarse a vivir en otro planeta. El ciclo de los días y las noches es prácticamente el mismo que en la Tierra (el día en Marte dura 24,6 horas). Pero un año es casi el doble de largo. La temperatura en Marte nunca supera el punto de fusión del hielo. Las tormentas de polvo son feroces en ese planeta. La arena de Marte tiene la consistencia de los polvos de talco, y son habituales las tormentas de polvo que oscurecen la superficie del planeta.

¿ADAPTAR MARTE A LAS CONDICIONES DE LA TIERRA?

Suponiendo que a mediados de siglo unos astronautas visiten Marte y establezcan allí un primitivo destacamento marciano, cabe pensar que esos astronautas se planteen la posibilidad de adaptar Marte a las condiciones de la Tierra, es decir, transformar ese planeta con el fin de hacerlo menos inhóspito y más apto para la vida. Este proceso comenzaría, como muy pronto, a finales del siglo XXI, o más probablemente a principios del siglo XXII.

Algunos científicos han analizado varias maneras de adaptar Marte a las condiciones de la Tierra. La más sencilla consistiría quizá en inyectar metano u otros gases de efecto invernadero en la atmósfera marciana. Dado que el gas metano es un gas de efecto invernadero aún más potente que el dióxido de carbono, se conseguiría atrapar la luz solar, haciendo así que la temperatura de la superficie de Marte se elevara por encima del punto de fusión del hielo. Además del metano, se han estudiado otros gases de efecto invernadero como el amoníaco y los clorofluorocarbonos para posibles experimentos de adaptación de Marte a las condiciones terrestres.

Una vez que la temperatura comience a elevarse, el permafrost del subsuelo empezará a descongelarse por primera vez en miles de millones de años. Cuando el permafrost se funda, las cuencas fluviales comenzarán a llenarse de agua. Finalmente podrían formarse de nuevo lagos e incluso océanos en la superficie de Marte, al tiempo que la atmósfera del planeta se hacía más densa. Esto liberaría más dióxido de carbono, y así se pondría en funcionamiento un bucle de retroalimentación positiva.

En 2009 se descubrió que el gas metano emana de forma natural de la superficie marciana. La fuente de este gas es todavía un misterio. En la Tierra, la mayor parte del metano procede de la descomposición de materia orgánica. Pero en Marte, el gas metano podría ser un producto secundario de ciertos procesos geológicos. Si se pudiera localizar la fuente de este gas metano, quizá sería posible aumentar su producción y así modificar la atmósfera.

Otra posibilidad es desviar un cometa para que penetre en la atmósfera marciana. Si se consiguiera interceptar un cometa a una distancia suficientemente grande, entonces un pequeño codazo con un cohete, un impacto con una sonda o incluso el tirón gravitatorio de una nave espacial serían suficientes para desviarlo. Los cometas están hechos principalmente de agua helada y pasan periódicamente a gran velocidad por nuestro sistema solar. (El cometa Halley, por ejemplo, consiste en un núcleo, parecido a un cacahuete, y tiene apenas 32 kilómetros de diámetro, siendo su composición principalmente hielo y roca). El cometa, al acercarse gradualmente a la superficie de Marte, se encontraría con la fricción de la atmósfera, lo cual haría que se desintegrara lentamente, liberando vapor de agua en la atmósfera.

Si no hubiera cometas disponibles, también sería posible desviar una de las lunas de hielo de Júpiter o quizá un asteroide que contuviera hielo, como Ceres, del que se cree que contiene un 20 por ciento de agua. (Estas lunas y estos asteroides serían difíciles de desviar, ya que habitualmente están en órbitas estables). En vez de hacer que un cometa, una luna o un asteroide se desintegraran lentamente en sus órbitas alrededor de Marte, liberando vapor de agua, otra opción sería maniobrarlos para que produjeran un impacto controlado en los casquetes de hielo de Marte. Las regiones polares de este planeta son de dióxido de carbono congelado, un material que desaparece durante los meses de verano, y hielo, que compone la parte permanente de los casquetes helados. Si el cometa, la luna o el asteroide chocan con los casquetes de hielo, entonces pueden emitir una enorme cantidad de calor y vaporizar el hielo seco. Dado que el dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero, esto haría más densa la atmósfera y contribuiría a acelerar el calentamiento global de Marte. También podría crear un bucle de retroalimentación positiva. Cuanto más dióxido de carbono se libere desde los casquetes de hielo, más caliente se volverá el planeta, que a su vez liberará todavía más dióxido de carbono.

Otra sugerencia es la que plantea explotar bombas nucleares directamente sobre los casquetes de hielo. El inconveniente es que el agua líquida resultante podría contener lluvia radiactiva. O también podríamos intentar fabricar un reactor de fusión que fundiera los casquetes polares. Las plantas de fusión utilizan agua como combustible básico, y hay mucha agua congelada en Marte.

Una vez que la temperatura de Marte se elevara hasta el punto de fusión del hielo, podrían formarse charcas de agua, y se podría introducir en Marte unas algas que en la Tierra crecen en el Antártico. En realidad, estas algas podrían desarrollarse en la atmósfera de Marte, que contiene un 95 por ciento de dióxido de carbono. También podrían modificarse genéticamente para maximizar su crecimiento en Marte. Estas charcas de algas podrían acelerar de distintas maneras la adaptación de Marte a las condiciones de la Tierra. En primer lugar, convertirían parte del dióxido de carbono en oxígeno. En segundo lugar, oscurecerían el color de la superficie de Marte, con lo que esta absorbería mejor el calor de la luz solar. En tercer lugar, puesto que crecen por sí mismas sin que tenga que impulsar su crecimiento ningún factor externo,

proporcionarían un modo relativamente barato de cambiar el medio ambiente del planeta. En cuarto lugar, las algas pueden cosecharse para obtener alimento. Finalmente, esas charcas de algas crearían suelo fértil y nutrientes que podrían ser adecuados para el crecimiento de plantas, que a su vez acelerarían la producción de oxígeno.

Los científicos han estudiado también la posibilidad de construir satélites solares que rodearan Marte, reflejando la luz solar hacia este planeta. Los satélites solares pueden ser por sí mismos capaces de calentar la superficie marciana por encima del punto de congelación del agua. Una vez que esto sucediera, y que el permafrost comenzara a derretirse, el planeta continuaría calentándose por su cuenta de manera natural.

¿BENEFICIO ECONÓMICO?

No hay que hacerse ilusiones con respecto a la posibilidad de que la colonización de la Luna y de Marte pudiera reportarnos beneficios de manera inmediata. Cuando Colón navegó hasta el Nuevo Mundo en 1492, abrió la puerta a una ganancia económica inesperada y única en la historia. Los conquistadores no tardaron en empezar a enviar a su país las enormes cantidades de oro que robaban a los nativos americanos, y los colonos pronto comenzaron a mandar valiosas materias primas y productos agrícolas al Viejo Mundo. El coste de enviar expediciones al Nuevo Mundo quedó más que compensado por las fabulosas fortunas que allí se pudieron amasar.

Pero la cuestión de tener colonias en la Luna o en Marte es bastante diferente. Allí no hay aire, ni agua líquida, ni suelo fértil, por lo que todo tendría que ser llevado en una nave, y eso es prohibitivamente caro.

Por otra parte, es muy escaso el valor militar que tiene colonizar la Luna, al menos a corto plazo. La razón es que, por término medio, se tarda tres días en llegar a la Luna desde la Tierra, o viceversa, pero una guerra nuclear mediante misiles balísticos intercontinentales puede durar tan solo noventa minutos. Una caballería espacial con base en la Luna no llegaría a tiempo para cambiar el curso de una batalla en la Tierra. Es por eso que el Pentágono no ha subvencionado ningún programa intensivo para militarizar la Luna.

Esto significa que, si iniciamos operaciones de minería a gran escala en otros mundos, será para beneficiar a las colonias espaciales, no a la Tierra. Los colonos extraerán los metales o los minerales para su propio uso, ya que costaría demasiado transportarlos a la Tierra. La actividad minera en el cinturón de asteroides solo tendría rentabilidad económica si tenemos colonias autosuficientes que puedan usar esas materias primas por sí mismas, lo cual no sucederá hasta finales de este siglo o, con mayor probabilidad, más tarde.

TURISMO ESPACIAL

Pero ¿cuándo viajará el ciudadano medio al espacio? Algunos visionarios, como el difunto Gerard O'Neill, de la Universidad de Princeton, soñaban con una colonia espacial que sería como una rueda gigante en la que habría viviendas, plantas de potabilización del agua, unidades de reciclado del aire, etcétera, y que se habría fundado para resolver el problema de superpoblación de la Tierra. Sin embargo, en el siglo XXI la idea de que unas colonias espaciales aliviarán el problema demográfico es, en el mejor de los casos, fantasiosa. Para la mayoría de los seres humanos, la Tierra será nuestro único hogar, al menos durante el próximo siglo, o más.

Sin embargo, hay un modo de que el ciudadano medio vaya al espacio que sí resulta realista: hacer turismo. Algunos empresarios que critican la enormidad del gasto y de la burocracia de la NASA, piensan que ellos podrían reducir los costes de los viajes espaciales recurriendo a las fuerzas del mercado. Burt Rutan y sus inversores ganaron el Ansari X Prize el 4 de octubre de 2004 por haber lanzado el SpaceShipOne dos veces en dos semanas hasta una distancia de unos 100 kilómetros por encima de la superficie terrestre. El SpaceShipOne es la primera nave espacial propulsada que ha realizado con éxito un viaje al espacio con financiación privada. El coste del proyecto fue de unos 25 millones de dólares. Un multimillonario de Microsoft, Paul Allen, contribuyó a garantizar el proyecto.

Ahora, mediante el SpaceShipTwo, Rutan espera poder iniciar las pruebas para hacer realidad la navegación espacial comercial. El multimillonario Richard Branson, de la compañía aérea Virgin Atlantic, ha creado la empresa Virgin Galactic, con una base de lanzamiento en Nuevo México y una larga lista de personas que se gastarán 200.000 dólares para hacer realidad su sueño de viajar por el espacio. Virgin Galactic, que será la primera empresa importante que ofrezca vuelos comerciales al espacio, ha encargado ya cinco cohetes SpaceShipTwo. Si el proyecto tiene éxito, podría reducir a la décima parte los costes de la navegación espacial.

El SpaceShipTwo utiliza varios métodos para reducir los costes. En vez de usar unos enormes cohetes propulsores para llevar la carga al espacio, Rutan coloca su nave espacial sobre un aeroplano, de tal modo que consigue transportarla como sobre una plataforma valiéndose de un avión aerobio estándar. De esta manera solo se consume el oxígeno de la atmósfera para subir a grandes altitudes. Luego, a unos 16 kilómetros de la superficie terrestre, la nave espacial se separa del aeroplano y enciende sus motores de propulsión. Aunque la nave no puede orbitar la Tierra, dispone de combustible suficiente para subir a casi 113 kilómetros de altura sobre la superficie terrestre, saliendo prácticamente de la atmósfera, de tal modo que los pasajeros pueden ver cómo el cielo se vuelve morado y luego negro. Sus motores son suficientemente potentes para conseguir alcanzar una velocidad Mach 3, o sea, tres veces la velocidad del sonido (aproximadamente, 3.500 kilómetros por hora). Desde luego, esta velocidad no es suficiente para poner un cohete en órbita (para eso habría

que llegar a los 30.000 kilómetros por hora), pero basta para llevarnos al límite de la atmósfera y al umbral del espacio exterior. En un futuro cercano es posible que un viaje al espacio no nos cueste más que un safari en África.

(Sin embargo, para dar una vuelta completa a la Tierra, tendríamos que pagar muchísimo más, con el fin de hacer un viaje a la Estación Espacial. Una vez le pregunté a Charles Simonyi, un multimillonario de Microsoft, cuánto le había costado un billete a la Estación Espacial. La prensa estimaba el coste en 20 millones de dólares. Me dijo que era reacio a dar el coste preciso, pero que las informaciones de los medios de comunicación no andaban muy lejos. Se lo había pasado tan bien que había viajado dos veces al espacio. Desde luego, los viajes espaciales, incluso en el futuro cercano, seguirán siendo para gente adinerada).

No obstante, el turismo espacial recibió un gran estímulo cuando, en septiembre de 2010, la Boeing Corporation anunció que iba a entrar también en el negocio con unos vuelos comerciales para turistas que había proyectado para 2015. Sería esto lo que reforzó la decisión del presidente Obama de ceder a la empresa privada el programa de vuelos espaciales tripulados. El proyecto de Boeing propone lanzamientos de vuelos a la Estación Espacial Internacional desde Cabo Cañaveral, Florida, de modo que cada vuelo llevaría una tripulación de cuatro miembros, lo cual dejaría tres asientos libres para turistas espaciales. Sin embargo, Boeing fue contundente con respecto a la financiación para las misiones privadas al espacio: el contribuyente tendría que pagar la mayor parte de la factura. «Se trata de un mercado incierto —dice John Elbon, director de programación para la gestión de tripulaciones comerciales de Boeing—. Si tuviéramos que hacer esto solo con la inversión de Boeing y con los factores de riesgo que el negocio conlleva, no podríamos cerrar el negocio[3]».

COMODINES

Los tremendos costes de la navegación espacial han obstaculizado tanto el progreso comercial como el científico, por lo que necesitamos un nuevo diseño revolucionario. A mediados de siglo, los científicos y los ingenieros estarán perfeccionando nuevas tecnologías para los cohetes propulsores, con el fin de bajar los costes de la navegación espacial.

El físico Freeman Dyson ha reducido los costes de algunas tecnologías experimentales que algún día pueden abrir los cielos a personas de capacidad adquisitiva media[4]. Esas propuestas son todas de alto riesgo, pero podrían abaratar los costes de una manera drástica. La primera es el motor de propulsión de láser; este motor dispara un rayo láser altamente potente en el extremo inferior del cohete, produciendo una miniexplosión cuya onda de choque impulsa el cohete hacia arriba. Un chorro continuo de ráfagas de láser que se disparan a gran velocidad vaporiza el

agua, y esto impulsa el cohete hacia el espacio. La gran ventaja del sistema de propulsión por láser es que la energía procede de un sistema terrestre. El cohete de láser no contiene combustible alguno. (Por el contrario, los cohetes químicos desperdician gran parte de su energía transportando el peso de su combustible al espacio).

La tecnología del sistema de propulsión por láser ya ha sido probada, y el primer éxito en la prueba de un modelo data de 1997. Leik Myrabo, del Instituto Politécnico Rensselaer de Nueva York, ha creado unos prototipos viables de este cohete, al que llama «demostrador de la tecnología lightcraft (aeronave propulsada por haz de luz)». Un diseño anterior tenía 15 centímetros de diámetro y pesaba unos 57 gramos. Un láser de 10 kilovatios generaba una serie de explosiones en el extremo inferior del cohete, produciendo un sonido de ametralladora mientras las explosiones de aire impulsaban el cohete con una aceleración de 2 g (dos veces la aceleración de la gravedad en la Tierra, o 19,5 metros por segundo cada segundo). Myrabo ha logrado construir unos cohetes llamados lightcraft que han ascendido más de 30 metros en el aire (equivalentes a los primeros cohetes de combustible líquido construidos por Robert Goddard en la década de 1930).

Dyson sueña con el día en que los sistemas de propulsión por láser puedan colocar pesadas cargas en órbita alrededor de la Tierra al módico precio de 10 dólares por kilo, lo cual realmente revolucionaría la navegación espacial. Prevé la creación de un láser gigantesco de 1.000 megavatios (la producción de energía de una central nuclear estándar) que podrá impulsar un cohete de dos toneladas para ponerlo en órbita. Este cohete consta de la carga y un depósito de agua en su extremo inferior, que gotea agua lentamente a través de unos poros diminutos. La carga y el depósito de agua pesan cada uno una tonelada. Cuando el rayo láser incide en la parte inferior del cohete, el agua se vaporiza al instante, generando una sucesión de ondas de choque que impulsan el cohete hacia el espacio. El cohete alcanza una aceleración de 3 g y abandona el campo gravitatorio terrestre en seis minutos.

Dado que esta nave espacial no transporta combustible, no existe peligro alguno de que el cohete propulsor sufra una explosión catastrófica. Tras cincuenta años de era espacial, los cohetes químicos siguen teniendo una tasa aproximada de fallos del 1 por ciento. Y estos fallos son espectaculares, porque el volátil combustible de oxígeno e hidrógeno crea enormes bolas de fuego y una lluvia de restos que caen por todo el campo de lanzamiento. En cambio, este sistema es sencillo y seguro, y puede utilizarse repetidamente con un tiempo de descanso muy breve, ya que solo emplea agua y un láser.

Además, este sistema se amortizaría finalmente. Si puede lanzar medio millón de naves espaciales al año, las cantidades cobradas por esos lanzamientos compensarían holgadamente los costes de explotación, así como los de fabricación. Sin embargo, Dyson es consciente de que este sueño tardará muchas décadas en hacerse realidad. La investigación básica para desarrollar esos láseres gigantescos requiere una

subvención que supera con mucho la que puede proporcionar una universidad. A menos que la investigación reciba el apoyo de una gran empresa o del Estado, el sistema de propulsión por láser nunca se construirá.

Es aquí donde el X Prize puede ayudar. En una ocasión hablé con Peter Diamandis, que creó el X Prize en 1996, y se mostró muy consciente de las limitaciones de los cohetes químicos. Me reconoció que incluso el SpaceShipTwo se enfrenta al problema de que los cohetes químicos son una manera cara de escapar de la gravedad terrestre. En consecuencia, algún futuro X Prize se concederá a alguien que pueda crear un cohete propulsado por un rayo de energía. (Pero en vez de usar un rayo láser, usaría una fuente similar de energía electromagnética: microondas). La publicidad del X Prize y el atractivo de su dotación de varios millones de dólares podrían bastar para suscitar el interés de empresarios e inventores por crear cohetes no químicos tales como el cohete de microondas.

Existen otros diseños experimentales de cohetes, pero presentan diversos riesgos. Una posibilidad es el cañón de gas, que dispara proyectiles mediante un enorme tubo, un artilugio similar al cohete de la novela de Jules Verne *De la Tierra a la Luna*. El cohete de Verne, sin embargo, nunca volaría, porque la pólvora no puede disparar un proyectil a 40.000 kilómetros por hora, que es la velocidad necesaria para escapar de la gravedad terrestre. Por el contrario, el cañón de gas utiliza gas a alta presión en un largo tubo para disparar ráfagas de proyectiles a grandes velocidades. El difunto Abraham Hertzberg, de la Universidad de Washington en Seattle, construyó un prototipo de cañón que tiene 10 centímetros de diámetro y 914 centímetros de largo. El gas que hay dentro del cañón es una mezcla de metano y aire presurizada a veinticinco veces la presión atmosférica. Cuando el gas entra en ignición, la carga sale impulsada por la explosión a 30.000 g, una aceleración tan enorme que puede aplastar la mayoría de los objetos metálicos.

Hertzberg ha demostrado que el cañón de gas puede funcionar. Pero, para lanzar una carga al espacio exterior, el tubo debe ser mucho más largo, como de unos 230 metros, y tiene que utilizar distintos gases a lo largo de la trayectoria. Para impulsar la carga a una velocidad que le permita escapar de la gravedad, hay que usar hasta cinco etapas diferentes con distintos gases.

Los costes del lanzamiento con cañón de gas pueden ser incluso inferiores a los del sistema de propulsión por láser. Sin embargo, lanzar así naves con seres humanos es demasiado peligroso; solo podrán lanzarse cargas sólidas que puedan resistir una aceleración tan intensa.

Un tercer diseño experimental es el eslingatrón, que, como una bola sobre una cuerda, igual que una honda, impulsa las cargas describiendo círculos para luego lanzarlas al aire.

Hay un prototipo de Derek Tidman: un modelo de mesa capaz de lanzar un objeto poniéndolo a una velocidad de 90 metros por segundo en unos pocos segundos. El eslingatrón está formado por un tubo dispuesto en forma de rosco de 90 centímetros

de diámetro. La tubería propiamente dicha tiene 2,5 centímetros de diámetro y contiene una pequeña bola de acero. Cuando esta bola rueda por el tubo, unos pequeños motores la impulsan, de tal modo que la bola se mueve cada vez más rápido.

Un eslingatrón real que pueda lanzar una carga al espacio exterior ha de ser muchísimo más grande, con un diámetro de cientos o miles de metros, y capaz de bombear energía a la bola hasta que esta alcance una velocidad de al menos 110 metros por segundo. La bola saldría del eslingatrón con una aceleración de 1.000 g, suficiente para aplastar la mayoría de los objetos. Existen muchas cuestiones técnicas que han de ser resueltas, siendo la más importante la de la fricción entre la bola y el tubo, que ha de ser mínima.

Se tardará décadas en perfeccionar estos tres diseños, pero solo se podrá hacer con subvenciones del Estado o de empresas privadas. De otro modo, estos prototipos se quedarán para siempre sobre el tablero de dibujo.

EL FUTURO LEJANO
(DESDE 2070 HASTA 2100)

ASCENSOR ESPACIAL

A finales de este siglo, la nanotecnología llegará incluso a hacer posible el legendario ascensor espacial. Como en el cuento de Jack y el tallo de las habichuelas mágicas, seremos capaces de escalar hasta las nubes y más allá. Entraremos en un ascensor, pulsaremos el botón más alto y ascenderemos por una fibra de nanotubo de carbono de miles de kilómetros de longitud. Esto podría dar un vuelco a los costes de la navegación espacial.

En 1895, el físico ruso Konstantin Tsiolkovski se inspiró en la estructura de la torre Eiffel, que era entonces la construcción más alta del mundo en su género. Se hizo una pregunta muy sencilla: ¿Por qué no podemos construir una torre Eiffel que llegue hasta el espacio exterior? Calculó que, si fuera suficientemente alta, nunca caería, pues estaría sostenida por las leyes de la física. La llamó un «castillo celestial» en los cielos.

Imaginemos una bola sobre una cuerda, igual que una honda. Dando un impulso circular a la bola, la fuerza centrífuga basta para hacer que esta no se caiga. De manera similar, si un cable es suficientemente largo, la fuerza centrífuga le impedirá caer al suelo. El giro de la Tierra sobre su eje sería suficiente para mantener el cable en el cielo. Una vez que este cable estuviera tendido hacia los cielos, una cabina de ascensor que se deslizara a lo largo de este cable podría desplazarse al espacio.

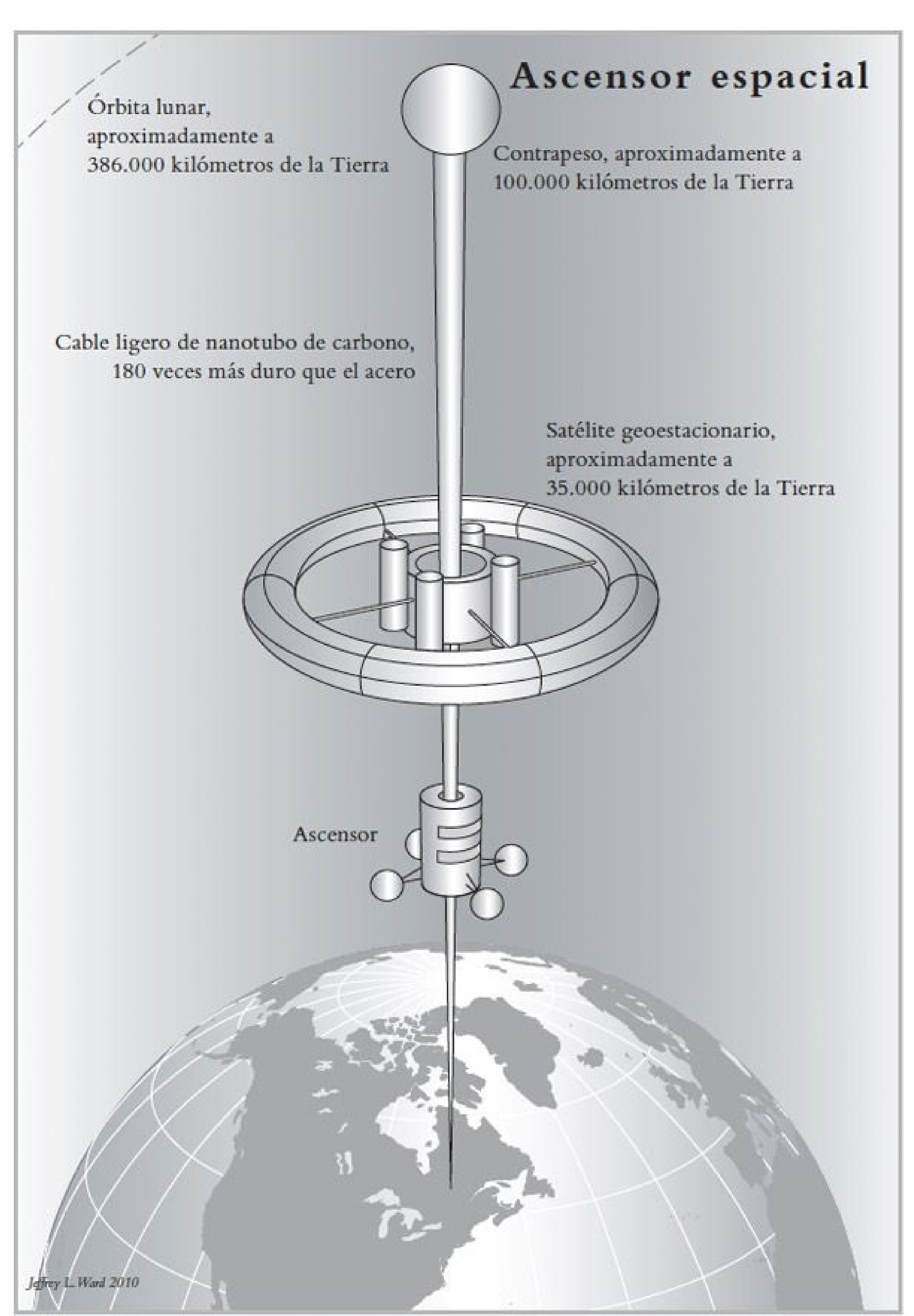
Sobre el papel parece que este truco funciona. Sin embargo, lamentablemente, si aplicamos las leyes del movimiento de Newton para calcular la tensión que sufre el cable, descubrimos que esta es mayor que la resistencia del acero a la tracción: el cable se romperá, con lo que el ascensor espacial es imposible.

A lo largo de décadas, se ha revisado periódicamente la idea del ascensor espacial, para ser finalmente rechazada por esta razón. En 1957, el científico ruso Yuri Artsutanov propuso una mejora, sugiriendo que el ascensor tendría que construirse de arriba abajo, en vez de hacerlo de abajo arriba, es decir, primero se pondría en órbita una nave espacial, y luego se haría descender un cable que se anclaría en la superficie terrestre. Además, algunos escritores de ciencia ficción popularizaron la idea de los ascensores espaciales. Es el caso de Arthur C. Clarke en *Fuentes del paraíso*, de 1979, y de Robert Heinlein en su novela *Viernes*, de 1982.

Los nanotubos de carbono han contribuido a resucitar esta idea. Estos nanotubos, como ya se ha explicado con anterioridad, poseen la mayor resistencia a la tracción que pueda tener cualquier material. Son más fuertes que el acero y tienen una resistencia suficiente para soportar la tensión que pueda darse en un ascensor espacial.

No obstante, el problema es crear un cable de nanotubo puro de carbono de unos 80.000 kilómetros de longitud. Este es un gran obstáculo, ya que, hasta ahora, los científicos solo han podido crear unos pocos centímetros de nanotubo puro de carbono. Existe la posibilidad de tejer juntos miles de millones de hilos de nanotubos de carbono para fabricar hojas y cables, pero estas fibras de nanotubo de carbono no son puras; se trata de fibras que han sido prensadas y tejidas unas con otras. El desafío es crear un nanotubo de carbono en el que todos los átomos de carbono estén en su sitio, es decir, correctamente situados.

En 2009, unos científicos de la Universidad Rice anunciaron una novedad. Sus fibras no son puras, sino compuestas (es decir, no son adecuadas para un ascensor espacial), pero su método es lo suficientemente versátil como para fabricar nanotubos de carbono de cualquier longitud. Por el método de ensayo y error descubrieron que sus nanotubos de carbono podían disolverse en una solución de ácido clorosulfónico, y luego sacaron la solución resultante por una boquilla similar a una alcachofa de ducha. Este método puede producir fibras de nanotubos de carbono cuyo espesor es de 50 micrómetros y con una longitud de cientos de metros.



Algún día, el ascensor espacial a los cielos podrá reducir enormemente los costes de la navegación espacial. La clave para construir el ascensor espacial puede estar en la nanotecnología.

Una aplicación comercial de estas fibras serían los tendidos eléctricos, ya que los nanotubos de carbono conducen la electricidad mejor que el cobre, son más ligeros y tienen menos averías. Matteo Pasquali, profesor de ingeniería de Rice, dice: «Para las líneas de transmisión es necesario fabricar toneladas, y actualmente no hay método alguno para hacer eso. Estamos a un milagro de distancia[5]».

Aunque esos cables no son suficientemente puros para ser utilizados en un ascensor espacial, esta investigación apunta hacia el día en que seremos capaces de producir hilos puros de nanotubos de carbono, lo suficientemente resistentes como para llevarnos a los cielos.

Suponiendo que en el futuro los científicos sean capaces de crear largos hilos de nanotubos de carbono puros, aun así seguirá habiendo problemas prácticos. Por ejemplo, el cable llegará mucho más allá de la órbita de la mayoría de los satélites, lo cual implica que las órbitas, tras pasar los satélites muchas veces alrededor de la Tierra, acabarán interceptando el ascensor espacial y produciendo un choque. Dado que los satélites suelen desplazarse a unos 29.000 kilómetros por hora, el impacto sería catastrófico. Esto significa que el ascensor tiene que estar equipado con unos cohetes especiales que puedan mover el cable fuera de la ruta de los satélites.

Otro problema es el que plantean las turbulencias meteorológicas, tales como huracanes, tormentas eléctricas y vientos fuertes. El ascensor espacial ha de estar anclado en la Tierra, quizá en un portaaviones o en una plataforma petrolífera en el océano Pacífico, pero debe ser flexible para evitar que las poderosas fuerzas de la naturaleza le causen daños.

Ha de haber también un botón de emergencia y una cápsula de salvamento para escapar en el caso de que el cable se rompa. Si algo rompe el cable, la cabina del ascensor ha de poder planear o bajar con un paracaídas hasta la superficie terrestre con el fin de salvar a los pasajeros.

Para estimular la puesta en marcha de investigaciones relativas a los ascensores espaciales, la NASA ha fomentado varios concursos. Se concede un total de dos millones de dólares en premios a través de los Juegos del Ascensor Espacial de la NASA, Según las reglas establecidas por la NASA, para ganar el Beam Power Challenge se ha de crear un dispositivo que no pese más de 50 kilogramos y pueda subir por una cuerda hasta una distancia de un kilómetro a una velocidad de 2 metros por segundo. Lo que hace que este desafío sea difícil es que el dispositivo no puede llevar combustible, ni pilas, ni un cable eléctrico. La energía ha de ser irradiada al dispositivo desde el exterior.

Tuve oportunidad de contemplar directamente el entusiasmo y la energía de los ingenieros que trabajan en el ascensor espacial y sueñan con recibir el premio. Volé a Seattle para reunirme con unos ingenieros jóvenes y emprendedores que formaban un grupo llamado LaserMotive. Habían oído el canto de sirena del concurso de la NASA y entonces empezaban a crear prototipos que algún día podrían activar el ascensor espacial.

Entré en un gran almacén que los ingenieros habían alquilado para probar sus inventos. En un lado del almacén vi un potente láser capaz de disparar un intenso rayo de energía. En el otro lado del almacén estaba su ascensor espacial. Era una caja de unos 90 centímetros de ancho con un gran espejo. El rayo de láser tenía que chocar con el espejo y ser desviado hacia una serie de células solares que convertirían la energía del láser en electricidad. Esta pondría en marcha un motor, y la cabina del ascensor ascendería gradualmente por un cable más bien corto. De esta manera, no sería necesario que unos cables eléctricos colgaran del ascensor para proporcionarle energía. Bastaría con disparar un láser al ascensor desde la superficie terrestre, y este subiría por el cable.

El láser era tan potente que todos tuvimos que ponernos unas gafas especiales para protegernos los ojos. Hubo que realizar numerosos intentos, pero finalmente consiguieron disparar el láser y hacer que el aparato subiera por el cable. Un aspecto del ascensor espacial estaba ya resuelto, al menos en teoría.

Al principio, la tarea resultaba tan difícil que nadie ganaba el premio[6]. Sin embargo, en 2009 LaserMotive recibió el premio. El concurso tuvo lugar en la Base de la Fuerza Aérea Edwards, en el desierto de Mojave, en California. Un helicóptero voló sobre el desierto sujetando un largo cable. El equipo LaserMotive consiguió que el ascensor subiera por el cable cuatro veces en dos días, siendo su mejor tiempo 3 minutos y 48 segundos. Por lo tanto, todo el duro trabajo del que fui testigo compensó finalmente a los jóvenes ingenieros.

NAVES ESPACIALES

A finales de siglo, incluso a pesar de los recientes retrocesos en financiación para las misiones espaciales tripuladas, los científicos probablemente habrán establecido sus puestos avanzados en Marte, y quizá también en el cinturón de asteroides. A continuación, pondrán sus miradas en una estrella real. Aunque una sonda interestelar es algo que está hoy en día completamente fuera de nuestro alcance, dentro de cien años podría ser una realidad.

El primer reto es encontrar un nuevo sistema de propulsión. Un cohete químico convencional tardaría unos 70.000 años en llegar a la estrella más cercana. Por ejemplo, las dos naves espaciales *Voyager*, lanzadas en 1977, establecieron un récord mundial entre todos los objetos enviados a las profundidades del espacio. Actualmente han llegado a adentrarse en el espacio unos 16.000 millones de kilómetros, pero esto es solo una porción ínfima de la distancia a las estrellas.

Se han propuesto varios diseños y sistemas de propulsión para las naves interestelares:

- la vela solar;

- el cohete nuclear;
- el estatorreactor de fusión nuclear;
- las nanonaves.

Tuve ocasión de conocer a uno de los visionarios de la vela solar cuando visité la Estación de Plum Brook en Cleveland, Ohio. Allí unos ingenieros han construido la cámara de vacío más grande del mundo para probar satélites espaciales. Esta cámara es realmente cavernosa: tiene 30 metros de anchura y 37 metros de altura, lo suficientemente grande para albergar varios edificios de apartamentos y, por supuesto, para probar satélites y cohetes en el vacío. Al entrar en la cámara, me sentí impresionado por la magnitud del proyecto. Pero también me consideré un privilegiado por estar en el lugar donde se habían probado muchos de los satélites, sondas y cohetes que han sido un hito en la carrera espacial estadounidense.

Allí conocí a uno de los más destacados defensores de la vela solar, el científico de la NASA Les Johnson. Me dijo que, desde que era un niño que leía ciencia ficción, soñaba con construir cohetes que pudieran llegar a las estrellas. Johnson incluso ha escrito un manual básico sobre velas solares. Aunque piensa que las velas solares serán realidad dentro de unas pocas décadas, está resignado y acepta el hecho de que una nave interestelar no podrá construirse hasta mucho después de que él haya fallecido. Como los albañiles que construyeron las grandes catedrales de la Edad Media, Johnson es consciente de que pueden pasar varias generaciones antes de que se fabrique una nave que pueda llegar a las estrellas.

La vela solar se basa en el hecho de que la luz, aunque no tiene masa, sí tiene velocidad, por lo que puede ejercer presión. A pesar de que la presión de la luz solar es extremadamente débil, demasiado leve para que la sintamos en nuestras manos, basta para impulsar una nave interestelar, si la vela es suficientemente grande, y esperamos el tiempo necesario. (En el espacio la luz solar es ocho veces más intensa que en la Tierra).

Johnson me dijo que su objetivo es crear una vela solar gigantesca, hecha de un plástico muy fino pero muy resistente. La vela tendría varios kilómetros de anchura y se construiría en el espacio exterior. Una vez montada, giraría lentamente en torno al Sol, adquiriendo cada vez más velocidad a medida que se moviera. Tras varios años orbitando alrededor del Sol, la vela haría un movimiento en espiral, saliendo del sistema solar y dirigiéndose a las estrellas. Según Johnson, esa vela solar podría enviar una sonda a una velocidad del 0,1 por ciento de la velocidad de la luz, y sería posible que dicha sonda llegara a la estrella más cercana en cuatrocientos años.

Con el fin de reducir el tiempo necesario para llegar a las estrellas, Johnson ha examinado distintos modos de añadir un impulso suplementario a la vela solar. Una posibilidad es emplazar una enorme batería de láseres en la superficie lunar. El rayo

láser incidiría en la vela y le daría una velocidad añadida para navegar hacia las estrellas.

Un problema que plantea la nave espacial impulsada por vela solar es la dificultad para detenerse y dar la vuelta, ya que la luz se mueve desde el Sol hacia el exterior. Una posible solución es invertir la dirección de la vela y usar la presión que ejerce la luz de la estrella de destino para frenar la nave espacial. Otra posibilidad es navegar alrededor de la lejana estrella utilizando la gravedad de la misma con el fin de producir un efecto de honda para el viaje de regreso. Y otra posibilidad más es aterrizar en una luna, construir baterías de láser, y luego navegar de regreso utilizando la luz de la estrella y los rayos láser procedentes de dicha luna.

Aunque Johnson sueña con las estrellas, también es consciente de que la realidad es mucho más modesta. En 1993, los rusos desplegaron en el espacio un reflector Mylar de unos 18 metros frente a la estación espacial Mir, pero solo sirvió para exhibir su despliegue. Un segundo intento fracasó. En 2004, los japoneses consiguieron lanzar dos prototipos de vela solar, pero una vez más se trató solo de un despliegue, sin que hubiera propulsión alguna. En 2005 hubo un ambicioso intento, llevado a cabo por la Planetary Society, el Cosmos Studios y la Academia Rusa de Ciencias, consistente en tratar de desplegar una auténtica vela solar llamada *Cosmos 1*. El lanzamiento se hizo desde un submarino ruso. Sin embargo, el cohete tipo Volna se lanzó mal y no logró alcanzar la órbita. Y en 2008, un equipo de la NASA intentó lanzar una vela solar llamada NanoSail-D, pero la vela se perdió a causa de un fallo en el cohete *Falcon 1*.

Finalmente, en mayo de 2010, la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial consiguió lanzar con éxito el IKAROS[7], la primera nave espacial que utiliza la tecnología de la vela solar en el espacio interplanetario. Esta nave lleva una vela cuadrada cuya diagonal mide 20 metros, y utiliza la propulsión mediante vela solar para viajar hacia Venus. Los japoneses tienen intención de enviar otra nave de propulsión por vela solar, en este caso a Júpiter.

EL COHETE NUCLEAR

También hay científicos que han considerado la posibilidad de utilizar energía atómica para impulsar una nave interestelar. A partir de 1953, la Comisión de la Energía Atómica empezó a valorar seriamente la idea de unos cohetes provistos de reactores atómicos, comenzando con el Proyecto Rover. En las décadas de 1950 y 1960, los experimentos con cohetes nucleares terminaron mayoritariamente en fracaso. Solían ser inestables y demasiado complicados para ser manejados adecuadamente. Por otra parte, un reactor de fisión ordinario, como se puede demostrar fácilmente, no produce energía suficiente para impulsar una nave

interestelar. Una central nuclear corriente produce unos mil millones de vatios de energía, lo cual no basta para llegar a las estrellas.

Sin embargo, en la década de 1950 unos científicos propusieron utilizar bombas atómicas y de hidrógeno, en vez de reactores, para impulsar una nave interestelar. El Proyecto Orión, por ejemplo, proponía un cohete propulsado por una sucesión de ondas producidas por las explosiones de un flujo de bombas atómicas. Una nave interestelar dejaría caer por la parte de atrás una serie de bombas atómicas, creando una sucesión de potentes ráfagas de rayos X. Entonces la onda de choque empujaría la nave interestelar hacia delante.

En 1959, unos físicos de General Atomics calcularon que una versión avanzada del Orión pesaría 8 millones de toneladas, con un diámetro de 400 metros, y recibiría la energía de 1.000 bombas de hidrógeno.

Un defensor entusiasta del Proyecto Orión fue el físico Freeman Dyson. «Para mí, Orión significaba abrir todo el sistema solar a la vida. Este proyecto podría haber cambiado la historia», decía Dyson. También habría sido una buena manera de librarse de las bombas atómicas. «Con un solo viaje nos habríamos librado de 2.000 bombas[8]», afirmaba.

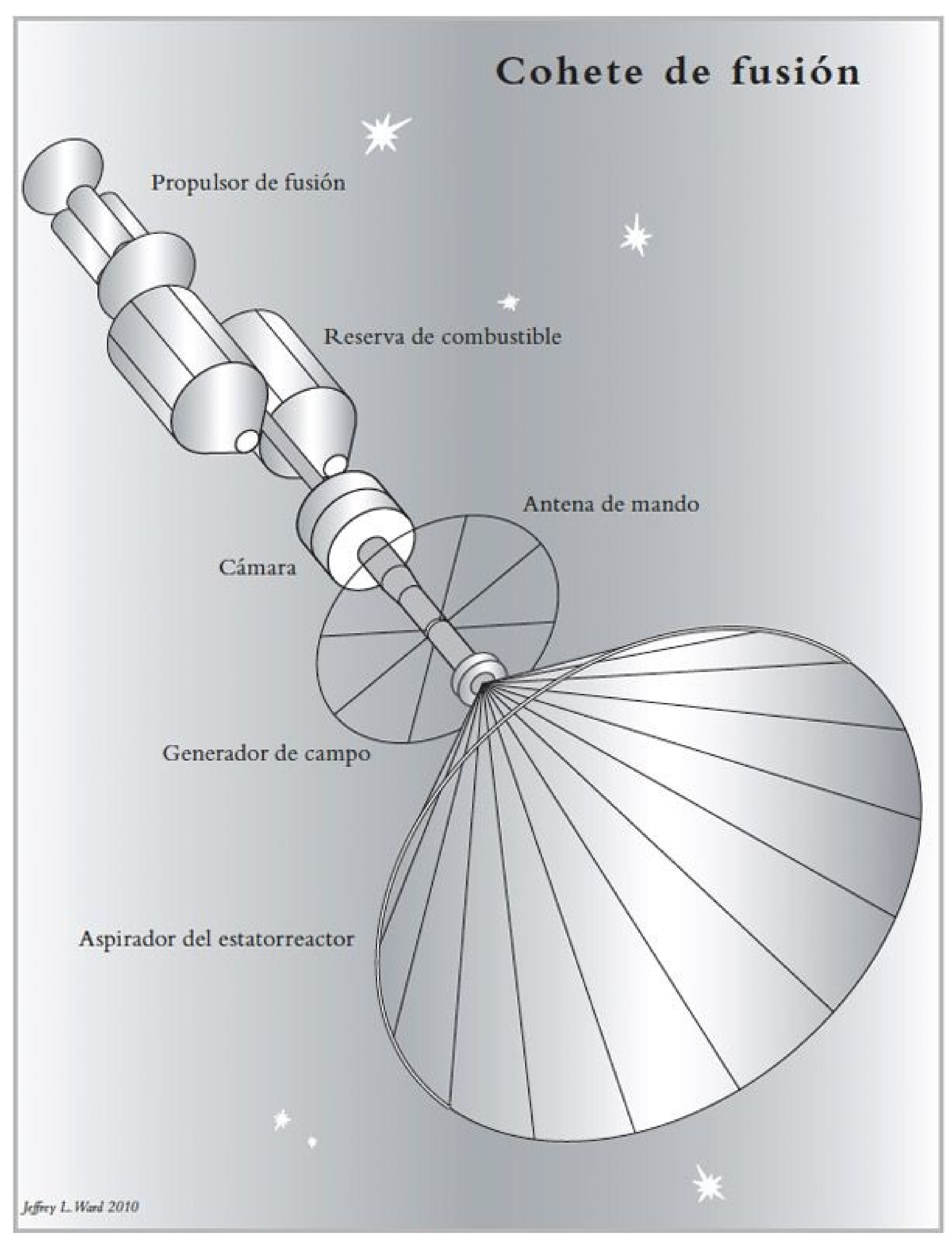
Sin embargo, lo que mató al Proyecto Orión fue el Tratado de Prohibición de Pruebas Nucleares de 1963, que prohibía probar armas nucleares sobre la superficie terrestre. Sin poder realizar pruebas, los físicos no podían perfeccionar el diseño del Orión, y el proyecto murió.

EL ESTATORREACTOR DE FUSIÓN NUCLEAR

Robert W. Bussard formuló en 1960 otra propuesta para la fabricación de un cohete nuclear; imaginó un motor de fusión similar a un reactor ordinario. Un estatorreactor aspira aire por la parte frontal y luego lo mezcla internamente con combustible químico. Mediante la ignición de la mezcla de aire y combustible, se produce una explosión química que genera un empuje. Bussard preveía aplicar el mismo principio básico a un motor de fusión. En vez de aspirar aire, el estatorreactor de fusión aspiraría gas hidrógeno, que se encuentra por todas partes en el espacio interestelar. Unos campos magnéticos comprimirían y calentarían el hidrógeno, hasta que este se fusionara para dar helio, liberando unas cantidades enormes de energía durante el proceso. Esto generaría una explosión que, a su vez, produciría un empuje. Dado que en las profundidades del espacio hay un suministro inagotable de hidrógeno, es plausible pensar que el estatorreactor puede funcionar indefinidamente.

Los diseños del cohete de estatorreactor de fusión tienen el aspecto de un cono de helado. El aspirador capta gas hidrógeno, que luego es enviado al estatorreactor, y allí se calienta y se fusiona con otros átomos de hidrógeno. Bussard calculó que si un estatorreactor de 1.000 toneladas podía mantener una aceleración de 9,8 metros por

segundo cada segundo (o sea, la aceleración del campo gravitatorio terrestre), se acercaría al 77 por ciento de la velocidad de la luz en solo un año. Dado que el estatorreactor puede funcionar indefinidamente, en teoría el cohete podría salir de nuestra galaxia y llegar a la galaxia de Andrómeda (que está a 2 millones de años luz de la Tierra) en solo 23 años, medidos por los astronautas dentro de la nave espacial. Como afirmaba Einstein en la teoría de la relatividad, el tiempo se frena en un cohete en movimiento, por lo que en la Tierra podrían haber transcurrido millones de años, pero los astronautas solo habrían envejecido 23 años.



En teoría, un estatorreactor de fusión puede funcionar indefinidamente, porque aspira el hidrógeno del espacio interestelar.

El estatorreactor se enfrenta a varios problemas. En primer lugar, dado que lo que existe mayoritariamente en el espacio interestelar son protones, el estatorreactor de fusión tiene que quemar combustible de hidrógeno puro, que no produce tanta

energía. (Hay muchas maneras de fusionar átomos de hidrógeno. El método preferido en nuestro planeta consiste en hacer la fusión de deuterio y tritio, que tiene mayor rentabilidad en cuanto a la producción de energía. Pero en el espacio exterior el hidrógeno se encuentra como un solo protón, por lo que los estatorreactores únicamente pueden fusionar protones con protones, lo cual no produce tanta energía como la fusión de deuterio y tritio). Sin embargo, Bussard demostró que, si se modifica la mezcla en el combustible añadiendo algo de carbono, este elemento actúa como catalizador para producir enormes cantidades de energía, lo suficiente para impulsar una nave interestelar.

En segundo lugar, el aspirador tendrá que ser enorme (del orden de 160 kilómetros de ancho) con el fin de recoger suficiente hidrógeno, por lo que tendrá que ser ensamblado en el espacio.

Hay otro problema que aún está sin resolver. En 1985, los ingenieros Robert Zubrin y Dana Andrews demostraron que la resistencia al avance que sufre el estatorreactor sería suficientemente elevada para impedirle acelerar hasta casi la velocidad de la luz. La resistencia al avance se debe a la resistencia que encuentra la nave interestelar cuando se mueve en un campo de átomos de hidrógeno. Sin embargo, su cálculo se basa en gran medida en ciertas hipótesis que tal vez no sean aplicables a los diseños de estatorreactores del futuro.

Actualmente, hasta que tengamos un mejor control del proceso de fusión (y también de la resistencia al avance causada por los iones que hay en el espacio), la decisión relativa a los estatorreactores de fusión está aún pendiente. Pero, si algún día estos problemas de ingeniería llegan a resolverse, el cohete de estatorreactor de fusión estará definitivamente en la lista de los seleccionados.

COHETES DE ANTIMATERIA

Otra posibilidad es utilizar la mayor fuente de energía que hay en el universo, es decir, la antimateria, para suministrar energía a las naves espaciales. La antimateria es lo opuesto a la materia, con carga de signo opuesto; por ejemplo, un electrón posee carga negativa, pero un electrón de antimateria (el positrón) tiene carga positiva. La antimateria, al entrar en contacto con la materia ordinaria, la aniquila. De hecho, una cucharadita de antimateria tiene energía suficiente para destruir toda el área metropolitana de Nueva York.

La antimateria es tan potente que Dan Brown hizo que los malos de su novela *Ángeles y demonios* prepararan una bomba para volar el Vaticano utilizando antimateria robada del CERN, en las afueras de Ginebra, en Suiza. A diferencia de la bomba de hidrógeno, cuya eficiencia es solo del 1 por ciento, una bomba de antimateria sería cien por cien eficiente, y convertiría la materia en energía según la fórmula de Einstein $E = mc^2$.

En principio, la antimateria constituye el combustible ideal para el cohete propulsor de una nave espacial. Gerald Smith, de la Universidad del Estado de Pensilvania, estima que 4 miligramos de antimateria nos llevarán a Marte, y 100 gramos quizá nos lleven a las estrellas más cercanas. En igualdad de peso, la antimateria libera mil millones de veces más energía que el combustible químico de los cohetes. Un motor de antimateria sería aparentemente muy sencillo. Basta con dejar fluir una corriente continua de partículas de antimateria por la cámara del cohete, donde se combinan con materia ordinaria y producen una explosión titánica. Entonces el gas explosivo es disparado hacia un extremo de la cámara, generando un empuje.

Aún estamos lejos de ese sueño. Hasta ahora los físicos han logrado crear antielectrones y antiprotones, así como átomos de antihidrógeno, donde los antielectrones giran alrededor de los antiprotones. Esto se hizo en el CERN y también en el Laboratorio Nacional Fermi (Fermilab), en las afueras de Chicago, en su Tevatron, el segundo acelerador de partículas más grande del mundo (el segundo después del Gran Colisionador de Hadrones, que está en el CERN). Los físicos de ambos laboratorios lanzaron contra un objetivo un rayo de partículas altamente energéticas, generando así una lluvia de escombros que contenía antiprotones. Se utilizaron unos potentes imanes para separar la antimateria de la materia ordinaria. Luego hubo que frenar los antiprotones, y se dejó que los antielectrones se mezclaran con ellos, creando así átomos de antihidrógeno.

Un hombre que ha reflexionado profundamente y durante mucho tiempo sobre las aplicaciones prácticas de la antimateria es Dave McGinnis, un físico del Fermilab. Mientras estábamos junto al Tevatron, me explicó las desalentadoras dificultades económicas que obstaculizaban la generación de antimateria. Me recalcó que el único modo conocido de producir con regularidad cantidades fijas de antimateria era usar un acelerador de partículas como el Tevatron; estos aparatos son extremadamente caros y solo producen unas cantidades minúsculas de antimateria. Por ejemplo, en 2004 el acelerador de partículas del CERN produjo varias billonésimas de gramo de antimateria con un coste de 20 millones de dólares. A ese precio, se arruinaría la economía del planeta por producir antimateria suficiente para proporcionar energía a una nave interestelar. Pero McGinnis insistió en que los motores de antimateria no son una idea disparatada. Cumplen todo lo que establecen las leyes de la física. Pero el coste de fabricar uno solo de estos motores será todavía prohibitivo en un futuro cercano.

Una de las razones por las que la antimateria resulta tan cara es el alto precio de los aceleradores de partículas que son necesarios para producirla. Sin embargo, estos aparatos son máquinas multiuso, diseñadas principalmente para producir exóticas partículas subatómicas, y no las partículas de antimateria más comunes. Son instrumentos de investigación, no aparatos comerciales. Se puede pensar que los costes descenderían considerablemente si se fabricara un nuevo tipo de acelerador de

partículas, diseñado especialmente para producir grandes cantidades de antimateria. Después, fabricando en serie esos aparatos, sería posible crear cantidades considerables de antimateria. Harold Gerrish, de la NASA, cree que el coste de la antimateria puede descender finalmente hasta los 5.000 dólares por microgramo.

Otra posibilidad es hallar un meteorito de antimateria en el espacio exterior. Si se encontrara un objeto así, este podría suministrar toda la energía que necesita una nave interestelar. De hecho, el satélite europeo PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and LightNuclei Astrophysics: Equipo para la Exploración de la Antimateria/Materia y Estudios de la Astrofísica de Núcleos Ligeros) se lanzó en 2006 para buscar de manera específica la antimateria que existe de forma natural en el espacio exterior.

Si se consigue encontrar en el espacio grandes cantidades de antimateria, se puede prever el uso de grandes redes electromagnéticas para recogerla.

Así pues, aunque los cohetes interestelares de antimateria cumplen ciertamente las leyes de la física, es probable que haya que esperar hasta finales de siglo para reducir su coste. Ahora bien, si esto se consiguiera, los cohetes de antimateria estarían entre los tipos de naves interestelares más interesantes.

NANONAVES

Cuando nos quedamos deslumbrados ante los efectos especiales que se ven en *La guerra de las galaxias* o en *Star Trek*, inmediatamente imaginamos una enorme y futurista nave interestelar llena hasta los topes de artilugios de tecnología punta. Sin embargo, otra posibilidad es usar la nanotecnología para crear naves interestelares diminutas, quizá no más grandes que un dedal o una aguja, o incluso más pequeñas. Tenemos la idea preconcebida de que una nave interestelar debe ser enorme, como la *Enterprise*, y capaz de llevar una tripulación de astronautas. Pero la nanotecnología puede miniaturizar las funciones esenciales de una nave interestelar, de modo que se puedan lanzar quizá millones de nanonaves para que lleguen a las estrellas cercanas, aunque quizá solo unas cuantas lo consigan. Una vez que lleguen a una luna cercana, podrían montar allí una fábrica para hacer un número ilimitado de copias de sí mismas.

Vint Cerf, uno de los padres de internet, contempla la posibilidad de que se creen unas diminutas nanonaves que puedan explorar no solo el sistema solar, sino también las estrellas. Cerf dice: «La exploración del sistema solar será más efectiva si se construyen unos dispositivos pequeños pero potentes a escala nano, que serán fáciles de transportar y depositar en la superficie, en el subsuelo y en las atmósferas de nuestros planetas y satélites vecinos… Incluso se podría extrapolar estas posibilidades a la exploración interestelar[9]».

En la naturaleza, los mamíferos producen solo unos pocos descendientes y se aseguran de que estos sobrevivan. Los insectos producen grandes cantidades, pero solo una pequeñísima fracción sobrevive. Ambas estrategias pueden mantener la especie viva durante millones de años. De manera similar, en vez de enviar una única y costosa nave interestelar a explorar las estrellas, se pueden enviar millones de naves diminutas, cada una de las cuales cuesta un penique y consume muy poco combustible.

Esta idea toma como modelo una estrategia de gran éxito que se encuentra en la naturaleza: la vida en enjambre. Los pájaros, las abejas y otros animales voladores se mueven en bandadas o enjambres. La seguridad no reside solo en el número, sino en que el enjambre actúa también como un rápido sistema de alarma. Si se produce una perturbación peligrosa en una parte del enjambre, como, por ejemplo, el ataque de un depredador, el mensaje se envía rápidamente al resto. También son bastante eficientes en cuanto a ahorro energético. Cuando los pájaros vuelan formando una V, la estela y la turbulencia creada por esa formación reduce la energía que cada ave necesita para volar.

Los científicos caracterizan el enjambre como un «superorganismo», algo que parece tener inteligencia propia, con independencia de las habilidades de cualquier individuo. Las hormigas, por ejemplo, poseen un sistema nervioso muy simple y un cerebro diminuto, pero todas juntas son capaces de construir complejos hormigueros. Los científicos intentan utilizar algunas de las lecciones que nos enseña la naturaleza y aplicarlas al diseño de enjambres de naves que viajarán algún día a otros planetas y estrellas.

Esto es similar al concepto hipotético de polvo inteligente que desea investigar el Pentágono: miles de millones de partículas enviadas a la atmósfera, cada una de ellas provista de diminutos sensores para realizar tareas de reconocimiento. No es que cada sensor por separado tenga una gran inteligencia, pero colectivamente pueden recoger y transmitir montañas de información. Por parte del Pentágono, DARPA ha subvencionado esta investigación para posibles aplicaciones militares, tales como el control de las posiciones del enemigo en el campo de batalla. En 2007 y 2009, las Fuerzas Aéreas emitieron informes sobre su planificación para las próximas décadas[10], y en ellos hay proyectos esbozados que van desde versiones avanzadas del Predator (que actualmente cuesta a 4,5 millones de dólares cada pieza) hasta enjambres de sensores más pequeños que una polilla y que cuestan unos pocos céntimos cada uno.

También los científicos están interesados en esta idea. Les gustaría dispersar polvo inteligente para controlar de forma instantánea miles de localizaciones durante los huracanes, las tormentas, las erupciones volcánicas, los terremotos, las inundaciones, los incendios forestales y otros fenómenos naturales. En la película *Twister*, por ejemplo, vemos una banda de audaces cazadores de tormentas jugándose la vida y la piel para colocar sensores en medio de un tornado. Pero esto no resulta

muy eficaz. En vez de tener a un grupo de científicos colocando unos cuantos sensores durante una erupción volcánica o un tornado, para medir la temperatura, la humedad y la velocidad del viento, el polvo inteligente puede proporcionarnos datos desde miles de posiciones diferentes al momento y en extensiones de cientos de kilómetros. Estos datos se introducen en un ordenador y nos dan al instante información en tiempo real y en tres dimensiones sobre la evolución de un huracán o de un volcán. Hay empresas que ya han empezado a comercializar estos diminutos sensores, algunos de los cuales no abultan más que una cabeza de alfiler.

Otra ventaja de las nanonaves es que se necesita muy poco combustible para enviarlas al espacio. En vez de utilizar enormes cohetes propulsores que solo alcanzan los 40.000 kilómetros por hora, es relativamente fácil enviar objetos diminutos al espacio a unas velocidades increíbles. De hecho, es sencillo enviar partículas subatómicas a velocidades cercanas a la de la luz utilizando para ello campos eléctricos ordinarios. Estas nanopartículas transportan una pequeña carga eléctrica y pueden ser aceleradas fácilmente mediante campos eléctricos.

En vez de invertir grandes recursos para enviar una sonda a otra luna u otro planeta, una única sonda tendría la capacidad de autorreplicarse y crear así toda una fábrica de sondas e incluso una base lunar. Estas sondas autorreplicantes podrían salir luego volando para explorar otros mundos. (El problema es crear la primera nanosonda autorreplicante, que todavía queda para un futuro lejano).

En 1980, la NASA se tomó muy en serio la idea de autorreplicar sondas robóticas, tan en serio que encargó un estudio especial llamado «Automatización avanzada para misiones espaciales», que se llevó a cabo en la Universidad de Santa Clara y contemplaba distintas posibilidades. Una de las que examinaron los científicos de la NASA fue la de enviar pequeños robots autorreplicantes a la Luna. Allí, el robot utilizaría la tierra y crearía un número ilimitado de copias de sí mismo.

La mayor parte del informe estaba dedicado a los detalles de la construcción de una factoría química para procesar rocas lunares (la capa continua de material fragmentario llamada regolito). Por ejemplo, el robot podía alunizar y luego desensamblarse por sí mismo, para reorganizar sus piezas a continuación, creando una factoría nueva, como si fuera uno de esos robots de juguete que se transforman. Por poner un caso, el robot podría crear grandes espejos parabólicos para concentrar la luz solar y empezar a fundir las piedras del regolito. A continuación, el robot realizaría una lixiviación con ácido fluorhídrico para procesar los materiales del regolito, extrayendo de ellos los minerales y metales utilizables. Los metales podrían luego fabricarse en la base lunar. Finalmente, el robot construiría una pequeña factoría lunar para reproducirse a sí mismo.

En 2002, a partir de este informe, el Instituto de Conceptos Avanzados de la NASA comenzó a financiar una serie de proyectos basados en aquellos robots autorreplicantes. Un científico que se ha tomado muy en serio la propuesta de hacer una nave interestelar en un chip es Mason Peck, de la Universidad Cornell.

Tuve la oportunidad de visitar a Peck en su laboratorio, donde podía verse su banco de trabajo lleno de componentes que algún día podrían ser lanzados y puestos en órbita. Junto a su banco de trabajo había una habitación pequeña y limpia, con las paredes forradas de plástico, donde se ensamblaban delicados componentes para satélites.

La visión de la exploración espacial que tiene Mason Peck es bastante diferente de la que nos ofrecen las películas de Hollywood. Él imagina un microchip de un centímetro que pesa un gramo y que puede ser acelerado hasta darle una velocidad que oscila entre el 1 y el 10 por ciento de la velocidad de la luz. Aprovecha el efecto de honda que la NASA utiliza para lanzar naves espaciales a velocidades enormes. Esta maniobra, ayudada por la gravedad, es aplicable al envío de una nave espacial a orbitar alrededor de un planeta, como una roca lanzada mediante una honda, utilizando para ello la gravedad del planeta con el fin de incrementar la velocidad de la nave.

Pero, en vez de la gravedad, Peck quiere usar fuerzas magnéticas. Su idea consiste en enviar una nave espacial con forma de microchip a agitarse por el campo magnético de Júpiter, que es 20.000 veces más potente que el de la Tierra. Su plan es acelerar su nanonave interestelar con la fuerza magnética que se usa para lanzar partículas subatómicas a billones de voltios en nuestros aceleradores de partículas.

Me enseñó un chip de muestra que, según él, algún día podría ser lanzado y puesto en órbita alrededor de Júpiter. Se trataba de un cuadrado diminuto, más pequeño que la yema de un dedo, abarrotado de circuitos. Su nave interestelar sería muy sencilla. Por un lado del chip hay una célula solar que proporciona energía para la comunicación. Por el otro lado hay un radiotransmisor, una cámara y otros sensores. El aparato carece de motor, ya que su propulsión se realiza utilizando únicamente el campo magnético de Júpiter. (El Instituto de Conceptos Avanzados de la NASA, que desde 1998 financió esta y otras propuestas innovadoras para el programa espacial, lamentablemente se cerró en 2007 a causa de las reducciones presupuestarias).

Como ya se ha dicho, la visión de Peck sobre lo que sería una nave interestelar difiere por completo de la que se encuentra habitualmente en la ciencia ficción, donde enormes naves se mueven pesadamente por el espacio, pilotadas por una tripulación de audaces astronautas. Por ejemplo, si se estableciera una base en una luna de Júpiter, podrían dispararse legiones de estos chips diminutos para situarlos en órbita alrededor de este planeta gigantesco. Si se instalara además una batería de cañones de láser en esa luna, los chips podrían ser acelerados bombardeándolos con rayos láser, con lo que su velocidad aumentaría hasta alcanzar una fracción de la velocidad de la luz.

Entonces le hice una pregunta sencilla: ¿Podría usted reducir los chips a un tamaño de moléculas utilizando la nanotecnología? En ese caso, en vez de usar los campos magnéticos de Júpiter para acelerar los chips, podría usted utilizar

aceleradores de partículas situados en nuestra Luna para lanzar sondas de tamaño molecular a una velocidad cercana a la de la luz. Peck se mostró de acuerdo con que esa sería una posibilidad real, pero dijo que aún no había elaborado los detalles de la misma.

Así pues, sacamos una hoja de papel y empezamos a esbozar juntos las fórmulas relativas a esta posibilidad. (Esta es la manera en que los investigadores trabajamos juntos, acercándonos a la pizarra o sacando una hoja de papel para resolver un problema mediante las fórmulas que vamos escribiendo). Escribimos las fórmulas de la fuerza de Lorentz, que Peck utiliza para acelerar sus chips que orbitarían alrededor de Júpiter, pero luego redujimos los chips a tamaño molecular y los colocamos en un hipotético acelerador similar al Gran Colisionador de Hadrones del CERN. Enseguida vimos cómo las fórmulas permitían que una nanonave interestelar acelerara hasta alcanzar casi la velocidad de la luz, utilizando solo un acelerador de partículas convencional emplazado en la Luna. Dado que estábamos reduciendo el tamaño de nuestra nave desde el de un chip hasta el de una molécula, podíamos reducir también el tamaño de nuestro acelerador desde el de Júpiter hasta el de un acelerador de partículas convencional. La idea tenía todos los visos de ser una posibilidad real.

Sin embargo, después de analizar las fórmulas, ambos estuvimos de acuerdo en que el único problema era la estabilidad de aquellas delicadas nanonaves interestelares. ¿Podría ser que la aceleración acabara desgarrando estas moléculas? Como una bola dando vueltas en el extremo de una cuerda, las moléculas experimentarían el tirón de las fuerzas centrífugas al ser aceleradas para llegar a una velocidad cercana a la de la luz. Además, estas moléculas adquirirían carga eléctrica, de modo que también las fuerzas eléctricas podrían desgarrarlas. Ambos llegamos a la conclusión de que las nanonaves eran una posibilidad claramente definida, pero se necesitarían décadas de investigación para reducir los chips de Peck al tamaño de una molécula y reforzarlos para que no se desintegraran al ser aceleradas hasta una velocidad cercana a la de la luz.

Como se ha dicho, el sueño de Mason Peck es enviar un enjambre de chips a la estrella más próxima, esperando que algunos de ellos crucen realmente el espacio interestelar. Pero ¿qué harán cuando lleguen?

Aquí es donde entran en escena los trabajos de Pei Zhang, de la Universidad Carnegie Mellon en Silicon Valley. Ha creado una flota de minihelicópteros que algún día podrán volar hacia otro planeta. Me mostró lleno de orgullo su flota de robots de enjambre, que parecen helicópteros de juguete. Pero el aspecto engaña. Pude ver que en el centro de cada uno había un chip abarrotado de sofisticados circuitos. Pulsando un botón, liberó cuatro robots de enjambre que volaban por el aire en todas las direcciones y remitían información. Enseguida me vi rodeado de robots de enjambre.

El objetivo de estos robots de enjambre, según me dijo Zhang, es proporcionar una ayuda crucial en situaciones de emergencia, como incendios y explosiones,

llevando a cabo tareas de reconocimiento y vigilancia. Al fin y al cabo, estos robots de enjambre podrían ir provistos de cámaras de televisión y sensores que detectarían temperaturas, presiones, la dirección del viento, etcétera, una información que puede resultar decisiva durante una emergencia. Miles de robots de enjambre podrían ser liberados sobre un campo de batalla, un incendio o incluso un territorio extraterrestre. Estos robots de enjambre también se comunican unos con otros. Si uno de ellos choca con un obstáculo, radia la información a los demás robots de enjambre.

Por consiguiente, una visión de la navegación espacial podría ser la de miles de chips baratos y desechables, inventados por personas como Mason Peck, que se lanzan a la estrella más cercana a una velocidad casi igual a la de la luz. Una vez que un puñado de ellos llegue a su destino, a esos chips les saldrán alas y palas de helicóptero, y volarán sobre el terreno extraterrestre, exactamente igual que la flota de robots de enjambre de Pei Zhang. Acto seguido, transmitirán información a la Tierra. Cuando se hayan encontrado planetas prometedores, podría enviarse una segunda generación de robots de enjambre para montar en esos planetas unas fábricas que creen más copias de dichos robots de enjambre, que luego puedan volar a la estrella más cercana. Y así indefinidamente.

¿ÉXODO DE LA TIERRA?

En 2100 es probable que hayamos enviado astronautas a Marte y al cinturón de asteroides, que hayamos explorado la lunas de Júpiter y hayamos dado los primeros pasos para enviar una sonda a las estrellas.

Pero ¿qué pasará con la humanidad? ¿Tendremos colonias en el espacio destinadas a aliviar la carga demográfica del planeta, encontrando nuevos hogares en el espacio exterior? ¿Empezará la humanidad en 2100 a abandonar la Tierra?

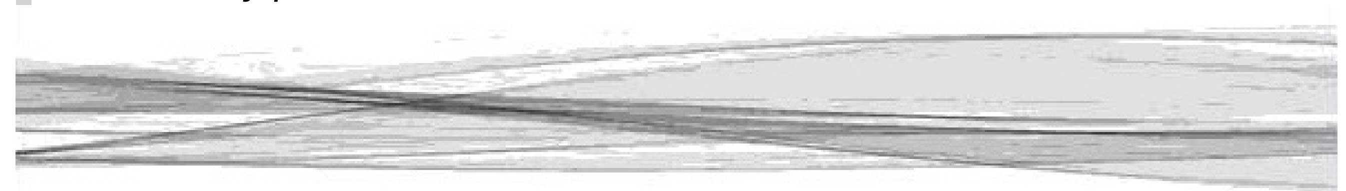
No. Dado el coste, incluso en 2100 y más tarde, la mayoría de los seres humanos no se subirán a una nave espacial para visitar otros planetas. Aunque unos cuantos astronautas habrán creado pequeños destacamentos en diversos planetas, la humanidad seguirá afincada en la Tierra.

Dado el hecho de que nuestro planeta será el hogar de la humanidad durante los siglos venideros, esto plantea otra pregunta: ¿Cómo evolucionará la civilización? ¿Cómo afectará la ciencia a nuestro estilo de vida, a nuestros trabajos y a nuestra sociedad? La ciencia es el motor de la prosperidad. Entonces, ¿qué nueva forma dará la ciencia a la civilización y a la riqueza en el futuro?

7

EL FUTURO DE LA RIQUEZA

Ganadores y perdedores



La tecnología y las ideologías están haciendo temblar los cimientos del capitalismo del siglo XXI. La tecnología hace que la preparación y el conocimiento sean las únicas fuentes de un beneficio estratégico sostenido.

LESTER THUROW

EN LA MITOLOGÍA, el auge y la caída de los grandes imperios dependían de la fuerza y la habilidad de sus ejércitos. Los grandes generales del Imperio romano acudían al templo de Marte, el dios de la guerra, para rendirle culto antes de emprender campañas militares decisivas. Las legendarias hazañas de Thor inspiraban a los vikingos el afán por combatir en heroicas batallas. Los antiguos construyeron enormes templos y monumentos dedicados a los dioses para conmemorar las victorias sobre sus enemigos.

Sin embargo, si analizamos el auge y la decadencia reales de las grandes civilizaciones, encontramos una historia completamente diferente.

Si usted fuera un alienígena de Marte que visita la Tierra en el año 1500 y contemplara todas las grandes civilizaciones, ¿cuál creería que iba a dominar en definitiva el mundo? La respuesta sería fácil: cualquier civilización menos la europea.

En Oriente vería usted la gran civilización china milenaria. La larga lista de los inventos en los que los chinos han sido pioneros no tiene parangón: el papel, la prensa de imprimir, la pólvora, la brújula, etcétera. Sus científicos son los mejores del planeta. Su gobierno está unificado y el país se encuentra en paz.

En el sur está el Imperio otomano, al que le faltó muy poco para invadir Europa. La gran civilización musulmana inventó el álgebra, realizó avances en óptica y física, y puso nombre a las estrellas. Aquí las artes y las ciencias florecen. Sus grandes ejércitos no encuentran una resistencia plausible. Estambul es uno de los grandes centros mundiales de aprendizaje de las ciencias.

A continuación, se encontraría usted con los lamentables países europeos, aquejados por el fundamentalismo religioso, los procesos contra las brujas y la Inquisición. La Europa occidental, que lleva mil años precipitándose a la decadencia desde el hundimiento del Imperio romano, está tan atrasada que no puede sino

importar tecnología. Es un agujero negro medieval. Los conocimientos heredados del Imperio romano se han desvanecido en su mayor parte hace ya tiempo, y han sido sustituidos por un dogma religioso que lo ahoga todo. Cualquier oposición o disidencia tropieza casi siempre con la tortura o algo peor. Por si esto fuera poco, los estados europeos se encuentran constantemente en guerra unos con otros.

¿Y qué sucedió? Tanto el gran Imperio chino como el otomano entrarían en un período de 500 años de estancamiento tecnológico, mientras que Europa iniciaría una dedicación sin precedentes a la ciencia y la tecnología.

A partir de 1405, el emperador chino Yongle ordenó que una enorme flota armada, la mayor que el mundo ha visto jamás, explorara el mundo. (Los tres insignificantes navíos de Colón habrían cabido perfectamente sobre la cubierta de una de aquellas colosales naves). Zarparon siete grandes expediciones, cada una de ellas mayor que la anterior. La flota navegó bordeando las costas del sudeste asiático para llegar luego a África, a Madagascar, y quizá más lejos. A su regreso, la flota llevaba una gran abundancia de mercancías, manjares exquisitos y animales exóticos de los confines de la Tierra. Actualmente se conservan unas extraordinarias tallas antiguas de madera que representan un desfile de jirafas africanas en un zoo de la dinastía Ming.

Sin embargo, los gobernantes chinos se sintieron decepcionados. ¿Eso era todo? ¿Dónde estaban los grandes ejércitos que podían rivalizar con los chinos? ¿Acaso los manjares exóticos y aquellos extraños animales eran todo lo que el resto del mundo podía ofrecer? Los posteriores gobernantes de China perdieron todo interés y dejaron que su gran flota naval entrara en decadencia y acabara desapareciendo. China se fue aislando gradualmente del mundo exterior, quedándose estancada, mientras que otros países se lanzaban al progreso.

Una actitud similar se instaló en el Imperio otomano. Tras haber conquistado la mayor parte del mundo conocido, los otomanos se encerraron en sí mismos, en un fundamentalismo religioso, y vivieron siglos de estancamiento. Mahathir bin Mohamed, que fue primer ministro de Malaisia, ha dicho: «La gran civilización islámica entró en decadencia cuando los eruditos musulmanes interpretaron que la adquisición de conocimientos, tal como ordenaba el Corán, se limitaba al conocimiento de la religión, y que cualquier otro conocimiento iba en contra del islam. En consecuencia, los musulmanes renunciaron al estudio de la ciencia, las matemáticas, la medicina y otras disciplinas llamadas mundanas. En cambio, dedicaron mucho tiempo a debatir sobre enseñanzas e interpretaciones islámicas, así como sobre la jurisprudencia y las prácticas del islam, lo cual les llevó a la ruptura de la *umma* y a la fundación de numerosas sectas, cultos y escuelas[1]».

Sin embargo, en Europa comenzaba un gran renacimiento. El comercio introdujo ideas nuevas y revolucionarias, cuya difusión se vio acelerada por la imprenta de Gutenberg. El poder de la Iglesia empezó a debilitarse, tras un milenio de dominación. Las universidades dejaron poco a poco de centrarse en la interpretación

de oscuros pasajes de la Biblia para dedicarse a la aplicación de la física de Newton y la química de Dalton y otros. El historiador Paul Kennedy, de la Universidad de Yale, añade un factor más a la explicación del meteórico ascenso de Europa: el estado permanente de guerra entre unas potencias europeas prácticamente igual de poderosas, ninguna de las cuales consiguió nunca dominar todo el continente. Los monarcas, que guerreaban constantemente los unos con los otros, financiaron la ciencia y la ingeniería para sus ambiciones territoriales. La ciencia no era únicamente un ejercicio académico, sino más bien una vía para crear nuevas armas y nuevas rutas por donde pudiera llegar la riqueza.

El auge de la ciencia y la tecnología en Europa pronto empezó a debilitar el poder de China y del Imperio otomano. La civilización musulmana, que había prosperado durante siglos como puerta para el comercio entre el este y el oeste, empezó a tambalearse cuando los marinos europeos trazaron rutas comerciales al Nuevo Mundo y a Oriente, rodeando África y evitando Oriente Próximo. Y China se vio atacada y dividida por cañoneros europeos, que paradójicamente empleaban dos inventos chinos fundamentales: la pólvora y la brújula.

La respuesta a la pregunta «¿Qué sucedió?» está clara. Sucedió que la ciencia y la tecnología emergieron. La ciencia y la tecnología son los motores de la prosperidad. Por supuesto, el ser humano es libre de optar por ignorar la ciencia y la tecnología, pero sabiendo a qué se arriesga. El mundo no se detiene porque nos pongamos a leer un texto religioso. Quien no domine el último grito en ciencia y tecnología tiene que saber que sus competidores lo harán.

EL DOMINIO DE LAS CUATRO FUERZAS

Pero, concretamente, ¿cómo fue que Europa, un caballo por el que nadie apostaba, se lanzara de repente y adelantara a China y al mundo musulmán, después de siglos de ignorancia? En este cambio tan notable intervienen factores tanto sociales como tecnológicos.

Si analizamos la historia del mundo a partir de 1500, está claro que Europa estaba madura para el gran paso que iba a dar, tras la decadencia del feudalismo, el ascenso de una clase burguesa y la irrupción del Renacimiento. Sin embargo, los físicos vieron esta gran transición a través de las lentes de las cuatro fuerzas fundamentales que gobiernan el universo. Son las fuerzas que pueden explicar todo lo que nos rodea, desde las máquinas, los cohetes y las bombas, hasta las estrellas del universo. Es posible que el cambio en las tendencias sociales ofreciera el escenario adecuado para esta transición, pero fue el dominio de estas fuerzas en Europa lo que finalmente impulsó a este continente hasta situarlo en cabeza, por delante de todas las potencias mundiales.

La primera fuerza es la gravedad, que nos mantiene anclados en el suelo, evita que el Sol explote y mantiene el sistema solar unido. La segunda es la fuerza electromagnética, que ilumina nuestras ciudades, suministra energía a las dínamos y los motores, y también al láser y a los ordenadores. La tercera y la cuarta son las fuerzas nucleares débil y fuerte, que mantienen el núcleo del átomo unido, iluminan las estrellas en los cielos, y producen el fuego nuclear en el centro de nuestro Sol. Estas cuatro fuerzas fueron descubiertas todas ellas en Europa.

Cada vez que los físicos llegaban a comprender una de estas fuerzas, la historia de la humanidad cambiaba, y Europa estaba muy bien dotada para aprovechar aquel nuevo conocimiento. Cuando Isaac Newton observó cómo caía una manzana y miró la Luna, se hizo a sí mismo una pregunta que cambió para siempre la historia de la humanidad: Si una manzana cae, entonces, ¿puede caerse también la Luna? En un instante de brillante perspicacia, cuando tenía veintitrés años Newton se dio cuenta de que las fuerzas que actúan sobre una manzana son las mismas que llegan hasta los planetas y cometas que hay en los cielos. Esto le permitió aplicar las nuevas matemáticas que acababa de inventar, concretamente el cálculo diferencial, para trazar las trayectorias de los planetas y las lunas, y descifrar por primera vez los movimientos de los cuerpos celestes. En 1687 publicó su obra maestra, los *Principia*, el libro científico más importante que se ha escrito nunca y uno de los libros más influyentes de la historia de la humanidad.

Más importante aún es el hecho de que Newton introdujo una nueva manera de pensar, una mecánica con la que se podía calcular el movimiento de los cuerpos a partir de las fuerzas que actúan sobre ellos. Ya no estaríamos sometidos nunca más a los caprichos de los espíritus, los demonios y los fantasmas, sino que hablaríamos de objetos movidos por fuerzas claramente definidas que se podrían medir, controlar y utilizar. Todo esto condujo a la formulación de la mecánica newtoniana, mediante la cual los científicos pudieron predecir con exactitud el comportamiento de las máquinas; a su vez, esto preparó el camino para la llegada de la máquina de vapor y la locomotora. La intrincada dinámica de las complejas máquinas de vapor pudo detallarse sistemáticamente clavija a clavija, palanca a palanca, mediante las leyes de Newton. Por lo tanto, la descripción de la gravedad que hizo Newton contribuyó a preparar el camino para la llegada a Europa de la revolución industrial.

Más adelante, en el siglo XIX, y de nuevo en Europa, Michael Faraday, James Clerk Maxwell y otros se hicieron con la segunda gran fuerza, el electromagnetismo, que preparó el camino para la siguiente gran revolución. Cuando Thomas Edison montó unos generadores en la Pearl Street Station, en el Lower Manhattan, y electrificó lo que sería la primera calle que tuvo electricidad en la Tierra, abrió las puertas a la electrificación de todo el planeta. Hoy en día, desde el espacio exterior, podemos contemplar en la Tierra continentes enteros iluminados por la noche. Cualquier extraterrestre, al contemplar la Tierra desde el espacio, puede saber de inmediato que los terrícolas dominan el electromagnetismo. Y nosotros, cada vez que

se produce un apagón, nos damos cuenta de lo grande que es nuestra dependencia de la electricidad. En un instante retrocedemos cien años en el pasado, al quedarnos sin tarjetas de crédito, ordenadores, iluminación, ascensores, televisión, radio, internet, motores de todo tipo, etcétera.

Por último, las fuerzas nucleares, descubiertas también por científicos europeos, están cambiando todo en nuestro entorno. No solo podemos desvelar los secretos de los cielos, tras conocer la fuente de energía que enciende las estrellas, sino que también podemos descifrar el mundo interior, utilizando este conocimiento en la medicina para exploraciones por resonancia magnética (IRM), tomografía axial computerizada (TAC) y tomografía por emisión de positrones (TEP), así como para radioterapias y medicina nuclear. Dado que las fuerzas nucleares gobiernan la inmensa cantidad de energía almacenada dentro del átomo, estas fuerzas pueden determinar en última instancia el destino de la humanidad, ya sea porque esta avance controlando la energía ilimitada de la fusión, o porque perezca en un infierno nuclear.

EL FUTURO CERCANO (DESDE EL PRESENTE HASTA 2030)

LAS CUATRO FASES DE LA TECNOLOGÍA

La combinación de unas condiciones sociales cambiantes y el dominio de las cuatro fuerzas impulsó a Europa a la vanguardia de las naciones. Ahora bien, las tecnologías son dinámicas, están cambiando continuamente. Nacen, evolucionan, ascienden y caen. Para ver cómo van a cambiar unas tecnologías determinadas en un futuro cercano, es útil ver cómo las tecnologías obedecen ciertas leyes de la evolución.

Las tecnologías de uso generalizado suelen evolucionar en cuatro fases básicas. Esto se puede ver en la evolución del papel, el agua corriente, la electricidad y los ordenadores. En la fase I los productos de la tecnología en cuestión son tan valiosos que se guardan celosamente. El papel, que se inventó en forma de papiro en el antiguo Egipto, y luego en China hace mil años, era algo tan valioso que un gran número de sacerdotes guardaban celosamente cualquier rollo de papiro. Esta humilde tecnología contribuyó a poner en marcha las civilizaciones antiguas.

El papel entró en su fase II hacia 1450, cuando Gutenberg inventó la imprenta con tipos móviles. Este invento hizo posible la existencia del «libro personal», de tal manera que una persona podía poseer un libro que contenía todo el conocimiento escrito en cientos de papiros. Antes de Gutenberg solo había unos 30.000 libros en toda Europa. En 1500, había 9 millones de libros, lo cual avivó un intenso fermento intelectual y estimuló la llegada de la era conocida como Renacimiento.

Pero hacia 1930, el papel llegó a la fase III, cuando su precio cayó a un céntimo la hoja. Esto hizo posible la existencia de la biblioteca personal, con lo que una persona podía poseer cientos de libros. El papel se convirtió en un objeto corriente de consumo que se vendía por toneladas. El papel está en todas partes y en ninguna, es invisible y ubicuo. Actualmente nos encontramos en la fase IV, en la que el papel es un artículo sujeto a la moda. Decoramos nuestro mundo con papel de todos los colores, formas y tamaños. La mayor fuente de basura urbana es el papel. Por lo tanto, el papel ha evolucionado desde ser un bien guardado celosamente hasta convertirse en basura.

Lo mismo se puede decir del agua corriente. En tiempos remotos, en la fase I el agua era un bien tan preciado que un solo pozo tenía que ser compartido por todo un pueblo. Esto fue así durante miles de años, hasta principios del siglo XX, cuando las cañerías personales fueron introduciéndose gradualmente y conseguimos entrar en la fase II. Después de la Segunda Guerra Mundial entró en la fase III y se convirtió en algo barato y accesible para una clase media en expansión. Hoy en día, el agua corriente se encuentra en la fase IV y es un medio de expresión estética que aparece con distintas formas, tamaños y aplicaciones. Decoramos nuestro mundo con agua, usándola en fuentes decorativas y exhibiciones diversas.

También la electricidad pasó por estas mismas fases. Con los trabajos pioneros de Thomas Edison y otros, en la fase I una fábrica disponía de una sola bombilla y un motor eléctrico, que tenían que ser compartidos. Después de la Primera Guerra Mundial, se pasó a la fase II, en la que la bombilla y el motor pasaron a ser de uso personal. Hoy en día, la electricidad ha desaparecido; está en todas partes y en ninguna. Incluso la palabra «electricidad» casi ha desaparecido del lenguaje. En Navidad utilizamos cientos de luces intermitentes para decorar nuestros hogares. Suponemos que la electricidad está escondida en los muros, por doquier. La electricidad es un medio de expresión estética que ilumina Broadway y decora nuestro mundo.

En la fase IV, tanto la electricidad como el agua corriente se han convertido en servicios públicos. Son tan baratos y los consumimos en cantidades tan grandes que es preciso medir la electricidad y el agua que se utilizan en los hogares.

Los ordenadores siguen la misma pauta. Las empresas que lo han entendido crecen y prosperan. Las que no lo entendieron se vieron casi abocadas a la quiebra. IBM fue dominante en la fase I al crear su procesador central en la década de 1950. Un procesador central era algo tan valioso que fue compartido por 100 científicos e ingenieros. Sin embargo, la dirección de IBM no valoró debidamente la ley de Moore, por lo que casi fueron a la quiebra cuando se entró en la fase II, en la década de 1980, con la llegada de los ordenadores personales.

Pero, incluso los fabricantes de ordenadores personales se confiaron demasiado. Previeron un mundo de ordenadores independientes, cada uno sobre una mesa, aislado de los demás. Les pilló con la guardia baja la llegada de la fase III, la de los

ordenadores conectados a internet, mediante los cuales una persona podía interactuar con millones de ordenadores. Actualmente, el único lugar en que podemos encontrar un ordenador aislado es un museo.

Así pues, el futuro del ordenador es entrar finalmente en la fase IV, donde desaparece para resucitar como medio de expresión estética. Decoraremos nuestro mundo con ordenadores. La propia palabra «ordenador» irá desapareciendo gradualmente del lenguaje. En el futuro, lo que más abunde en la basura urbana no será el papel, sino los chips. El futuro del ordenador es desaparecer y convertirse en un servicio público, que se venderá como la electricidad y el agua. Los chips informáticos irán desapareciendo poco a poco, a medida que el procesamiento informático se haga «en las nubes», es decir, mediante la «informática en nube», o *cloud computing*.

Como vemos, la evolución de los ordenadores no es un misterio; están siguiendo el mismo camino, ya muy trillado, de sus predecesores, como el papel, la electricidad y el agua corriente.

Pero internet y los ordenadores están todavía evolucionando. Al economista John Steele Gordon se le preguntó si esta revolución ha terminado. «Cielos, no. Pasarán cien años antes de que esté plenamente realizada y acabada, como sucedió con la máquina de vapor. Ahora estamos con internet en el mismo punto en que estaban con el ferrocarril en 1850. Esto es solo el comienzo[2]».

Hay que señalar que no todas las tecnologías llegan a las fases III y IV. Por ejemplo, pensemos en la locomotora. El transporte mecanizado entró en la fase I a principios del siglo XIX, con la llegada de la locomotora de vapor. Un centenar de personas compartían la misma locomotora. Se entró en la fase II a principios del siglo XX, con la introducción de la «locomotora personal», conocida también como «automóvil». Pero la locomotora y el automóvil (en esencia, un cajón que se desplaza sobre raíles o ruedas) no han cambiado mucho durante las últimas décadas. Los cambios introducidos son meros perfeccionamientos, tales como unos motores más potentes y eficientes, así como inteligencia. De modo que las tecnologías que no pueden acceder a las fases III y IV son simplemente embellecidas; por ejemplo, se añaden chips para hacerlas inteligentes. Algunas tecnologías no dejan de evolucionar continuamente hasta llegar a la fase IV, como la electricidad, los ordenadores, el papel y el agua corriente, mientras que otras se quedan atascadas en una fase intermedia, aunque continúen evolucionando mediante mejoras añadidas, como son los chips, y sigan aumentando su eficiencia.

BURBUJAS Y BANCARROTAS, ¿POR QUÉ?

Hoy en día, después de la gran recesión de 2008, se oyen algunas voces que afirman que todo este progreso ha sido una ilusión, que hemos de volver a los días en que

todo era más sencillo, que el sistema tiene algo que se está agrietando por su base.

Si se observa la historia con una larga perspectiva en el tiempo, es fácil encontrar lo inesperado, burbujas y quiebras de dimensiones colosales que parecen surgir de ninguna parte. Da la sensación de que son aleatorias, un producto secundario de la volubilidad del destino y de la locura humana. Hay historiadores y economistas que han escrito voluminosos libros sobre la quiebra de 2008, intentando explicarla a partir de una amplia diversidad de causas, tales como la naturaleza humana, la codicia, la corrupción, la falta de regulaciones, la debilidad de los controles, etcétera.

Sin embargo, yo veo la gran recesión de una manera diferente, a través de la lente de la ciencia. A largo plazo, la ciencia es el motor de la prosperidad. Por ejemplo, *The Oxford Encyclopedia of Economic History* cita estudios que «atribuyen el 90 por ciento del crecimiento de la renta desde 1780 en Inglaterra y Estados Unidos a la innovación tecnológica, no a la mera acumulación de capital[3]».

Sin ciencia, retrocederíamos milenios hasta el pasado remoto. Pero la ciencia no es uniforme; se presenta en oleadas. Un avance fundamental (por ejemplo, la máquina de vapor, la bombilla, el transistor) ocasiona a menudo una cascada de inventos secundarios que crean una avalancha de innovación y progreso. Dado que generan grandes cantidades de riqueza, estas oleadas se reflejan en la economía.

La primera oleada importante fue la energía generada por el vapor, que finalmente desembocaría en el invento de la locomotora. La energía del vapor alimentó la revolución industrial, que cambiaría la sociedad radicalmente. La energía de vapor generó una riqueza fabulosa. Ahora bien, en el capitalismo la riqueza nunca está inactiva. Ha de ir a algún sitio. Los capitalistas buscan sin cesar la oportunidad siguiente y mueven esta riqueza para invertirla en proyectos aún más especulativos, a veces con resultados catastróficos.

A principios del siglo XIX, gran parte del exceso de riqueza generado por la energía de vapor y la revolución industrial fue a parar a los valores ferroviarios de la Bolsa de Londres. De hecho, al aparecer numerosas compañías ferroviarias en el parqué londinense, empezó a formarse una burbuja. Virginia Postrel, que escribe sobre el mundo de los negocios para el *New York Times*, señalaba en un artículo: «Hace un siglo, las compañías ferroviarias constituían la mitad de los valores que cotizaban en la Bolsa de Nueva York[4]». Teniendo en cuenta que el ferrocarril estaba todavía dando sus primeros pasos, esta burbuja era insostenible y acabó por estallar, dando lugar al crac de 1850, uno de los grandes colapsos de la historia del capitalismo. Esta quiebra fue seguida por una serie de miniquiebras que se produjeron casi en cada década, causadas por el exceso de riqueza generado por la revolución industrial.

Aquí hay una paradoja: el auge del ferrocarril llegaría en las décadas de 1880 y 1890. En consecuencia, el crac de 1850 fue debido a la fiebre especulativa y a la riqueza creada por la ciencia, pero la tarea real de establecer líneas ferroviarias por el mundo tardaría muchas más décadas en dar sus frutos.

Thomas Friedman escribe: «En el siglo XIX, Estados Unidos experimentó un auge del ferrocarril, una burbuja y una quiebra. […] Pero, aunque la burbuja estalló, dejó a Estados Unidos con una infraestructura ferroviaria que hizo los viajes y el transporte transcontinentales mucho más cómodos y baratos que nunca[5]».

Se podría pensar que, a raíz de esto, el capitalismo habría aprendido una lección, pero, en vez de eso, empezó a repetirse el mismo ciclo poco después. Se produjo una segunda oleada tecnológica importante, impulsada por las revoluciones de la electricidad y la automoción de Edison y Ford. La electrificación de las fábricas y los hogares, así como la proliferación del Ford Modelo T, generaron una vez más riquezas fabulosas. Como siempre, el exceso de riqueza tenía que ir a algún sitio. En este caso fue a la Bolsa estadounidense en forma de una burbuja en los valores de servicios públicos y del sector del automóvil. Los inversores ignoraron la lección del crac de 1850, porque este se había producido ochenta años antes, es decir, en un pasado lejano. Desde 1900 hasta 1925, el número de empresas automovilísticas que arrancaban entonces llegó a 3.000, una cifra que el mercado simplemente no podía aguantar[6]. Una vez más, la burbuja era insostenible. Por esta y otras razones estalló en 1929, dando lugar a la Gran Depresión.

Pero aquí la paradoja es que la pavimentación y la electrificación de Estados Unidos y Europa no tendría lugar hasta bastante después del crac, durante las décadas de 1950 y 1960.

Más recientemente hemos tenido la tercera gran oleada de la ciencia: la llegada de la alta tecnología, en forma de ordenadores, láseres, satélites espaciales, internet y la electrónica. La fabulosa riqueza creada por la alta tecnología tenía que ir a parar a algún lugar. En este caso, se fue al negocio inmobiliario, creando una enorme burbuja. Cuando el valor de los bienes inmuebles subió por las nubes, la gente empezó a pedir préstamos sobre el valor de sus viviendas, utilizándolas como huchas, lo cual aceleró el crecimiento de la burbuja. Los banqueros carentes de escrúpulos inflaron esta burbuja concediendo hipotecas a manos llenas. Una vez más, la gente ignoró la lección de las quiebras de 1850 y 1929, que se produjeron hace 160 y 80 años respectivamente. En definitiva, esta nueva burbuja no pudo sostenerse, y hemos sufrido el crac de 2008 y la gran recesión.

Thomas Friedman escribe: «A principios del siglo XXI, en torno a los servicios financieros, se produjo un auge, una burbuja y ahora una quiebra. Pero me temo que todo lo que esto va a dejar tras de sí será un puñado de apartamentos vacíos en Florida que nunca debieron ser construidos, unos aviones privados usados que los ricos ya no pueden permitirse y los obsoletos contratos de derivados que nadie puede comprender[7]».

Sin embargo, a pesar de toda la estupidez que ha acompañado a esta última quiebra, la paradoja es que el tendido de cables y el establecimiento de redes en todo el mundo se realizarán después del crac de 2008. El apogeo de la revolución de la información está todavía por llegar.

Esto nos lleva a la pregunta siguiente: ¿Cuál es la cuarta oleada? Nadie puede saberlo con seguridad. Podría ser una combinación de inteligencia artificial, nanotecnología, telecomunicaciones y biotecnología. Como en los ciclos previos, puede que tengan que pasar otros ochenta años para que estas tecnologías creen una marejada de fabulosa riqueza. Queda la esperanza de que en 2090 la gente no ignore la lección de los ochenta años anteriores.

MEDIADOS DE SIGLO
(DESDE 2030 HASTA 2070)

GANADORES Y PERDEDORES: LOS EMPLEOS

Las tecnologías, a medida que evolucionan, van produciendo en la economía abruptos cambios que a veces desembocan en desequilibrios sociales. En toda revolución hay ganadores y perdedores. Esto se hará más evidente a mediados de siglo. Ya no tendremos herreros y constructores de carretas en todos los pueblos. Además, tampoco lamentaremos la desaparición de muchos de esos oficios. Pero la pregunta es: ¿Qué oficios surgirán a mediados de siglo? Con la evolución de la tecnología, ¿cómo cambiará el modo en que trabajamos?

Podemos determinar en parte la respuesta planteándonos una simple pregunta: ¿Cuáles son las limitaciones de los robots? Como ya hemos visto, en cuanto a la inteligencia artificial, hay al menos dos bloques básicos que suponen sendos obstáculos: la facultad de reconocer patrones y el sentido común. Por consiguiente, los empleos que sobrevivirán en el futuro serán, ante todo, aquellos cuyas tareas ningún robot pueda realizar, como, por ejemplo, las que requieren las dos facultades mencionadas.

Entre los trabajadores manuales, los perdedores serán aquellos que realizan tareas meramente repetitivas (como los trabajadores de la cadena de montaje de automóviles), porque para esto los robots son excelentes. Los ordenadores nos dan la ilusa sensación de que poseen inteligencia, pero esto es solo porque pueden sumar millones de veces más rápido que nosotros. Olvidamos que los ordenadores no son más que unas calculadoras sofisticadas, y lo que hacen mejor son los trabajos repetitivos. Esta es la razón por la que los trabajadores de la cadena de montaje de automóviles han estado entre los primeros que han padecido la revolución informática. En definitiva, desaparecerá cualquier trabajo industrial que pueda reducirse a un conjunto de movimientos prefijados y repetitivos.

Sorprendentemente hay una amplia clase de trabajos manuales que sobrevivirán a la revolución informática e incluso conocerán tiempos mejores. Los ganadores serán aquellos que realizan trabajos no repetitivos que requieren reconocimiento de

patrones. Los basureros, los policías, los trabajadores de la construcción, los jardineros y los fontaneros tendrán siempre trabajo en el futuro. Los basureros, para recoger las basuras en distintas casas y apartamentos, han de reconocer las bolsas, echarlas al camión y llevarlas al vertedero. Pero cada tipo de residuo requiere un método de eliminación diferente. En cuanto a los trabajadores de la construcción, cada tarea requiere herramientas, planos e instrucciones diferentes. No hay dos obras ni dos tareas que sean iguales. Los policías han de analizar crímenes diversos con circunstancias diferentes. Además, también deben comprender los motivos y los métodos de los criminales, lo cual queda muy lejos de las capacidades de un ordenador. De igual modo, cada jardín y cada desagüe son diferentes, lo cual requiere distintas habilidades y herramientas del jardinero y del fontanero.

Entre los trabajadores de oficina, los perdedores serán aquellos que realizan trabajos de intermediario, haciendo inventarios y recuentos. Esto significa que los representantes, corredores, dependientes, contables, etcétera, serán despedidos gradualmente a medida que sus puestos de trabajo vayan desapareciendo. Estos empleos se encuadran en lo que se llama «la fricción del capitalismo». Ahora mismo ya es posible comprar un billete de avión buscando en la web los mejores precios, prescindiendo del agente de viajes.

Merrill Lynch, por ejemplo, afirmó que nunca recurriría a negociar valores bursátiles en línea. Siempre haría las operaciones al modo tradicional. John Steffens, jefe de corretaje de Merrill, dijo: «El modelo de inversión "sírvase usted mismo", centrado en las operaciones por internet, ha de ser considerado como una seria amenaza para la vida financiera en Estados Unidos[8]». Por consiguiente, sufrió una humillación cuando finalmente, en 1999, se vio obligado por las fuerzas de mercado a sumarse a las operaciones en línea. «Rara vez en la historia se ha visto obligado el líder de un sector industrial a dar su brazo a torcer y, prácticamente de la noche a la mañana, adoptar lo que es en esencia un nuevo modelo de negocios», escribía Charles Gasparino, de ZDNet[9].

Esto implica también que la pirámide empresarial se reducirá. Dado que los que están en los puestos más altos de la empresa pueden interactuar directamente con los vendedores y representantes de ese campo, hay menos necesidad de mediadores que ejecuten las órdenes. De hecho, estas reducciones de plantilla se produjeron ya cuando el ordenador personal entró por primera vez en las oficinas.

Entonces, ¿cómo sobrevivirán los mediadores en el futuro? Tendrán que añadir valor a su trabajo y proveer ese servicio que los robots no pueden proporcionar: el sentido común.

Por ejemplo, en el futuro se podrá comprar una casa en internet utilizando el reloj de pulsera o las lentes de contacto. Sin embargo, nadie querrá comprar una casa de esta manera, ya que se trata de una de las transacciones financieras más importantes que se realizan en la vida. Para adquisiciones tan importantes como esta, se desea hablar con un ser humano que nos pueda explicar dónde están los buenos colegios,

dónde la tasa de criminalidad es baja, cómo funciona la red de alcantarillado, etcétera. Para esto queremos hablar con un agente cualificado que ofrece un valor añadido.

Asimismo, las transacciones en línea están echando de sus puestos de trabajo a los agentes de Bolsa de bajo nivel, pero siempre habrá demanda de agentes que ofrezcan sabios y razonados consejos al inversor. Los empleos relacionados con el corretaje seguirán extinguiéndose, salvo que se ofrezcan servicios de valor añadido, tales como la sabiduría de los analistas de mercado o de los economistas de alto nivel y el conocimiento interno que pueden aportar los corredores experimentados. En una era en que la negociación en línea reduce sin piedad el coste de las transacciones bursátiles, los corredores de Bolsa solo sobrevivirán si pueden ofertar también sus cualidades intangibles, tales como la experiencia, el conocimiento y el análisis.

Así, entre los trabajadores que no realizan trabajos manuales, los ganadores serán aquellos que puedan aportar un sentido común que resulte útil. Se trata de trabajadores capaces de ofrecer creatividad: trabajo artístico, actuación, humor, creación de programas informáticos, liderazgo, análisis, ciencia, en definitiva, las cualidades que «nos hacen humanos».

La gente que se dedica a las artes plásticas tendrá trabajo, ya que internet tiene un apetito insaciable de creatividad. Los ordenadores son fabulosos para duplicar el arte y ayudar a los artistas a embellecerlo, pero son un desastre en cuanto a originar nuevas formas artísticas. El arte que inspira, intriga, evoca emociones y nos produce escalofríos queda más allá de la capacidad del ordenador, porque todas estas cualidades requieren sentido común.

Los novelistas, guionistas y autores teatrales tendrán trabajo, ya que han de transmitir escenas realistas y expresar conflictos, derrotas y triunfos del ser humano. Para los ordenadores, hacer modelos de la naturaleza humana, comprendiendo motivos e intenciones, queda lejos de sus capacidades. A los ordenadores no se les da bien determinar qué es lo que nos hace llorar o reír, ya que no pueden llorar o reír por sí mismos, ni comprender si algo es triste o alegre.

Las personas que trabajan en relaciones humanas, como los abogados, tendrán empleos.

Aunque un robot abogado puede responder a preguntas rudimentarias sobre las leyes, la legislación está cambiando constantemente, dependiendo de estándares sociales y costumbres que varían. En última instancia, la interpretación de la ley se reduce a un juicio de valores, que es un asunto en el que los ordenadores son deficientes. Si la ley fuera perfectamente previsible, con interpretaciones claramente perfiladas, no se necesitarían tribunales, ni jueces, ni jurados. Un robot no puede reemplazar a un jurado, ya que los jurados suelen representar las costumbres y los usos de un grupo específico, que están cambiando constantemente con el paso del tiempo. Esto se puso de manifiesto cuando, en una ocasión, Potter Stewart, juez del

Tribunal Supremo, tuvo que definir la pornografía. No logró hacerlo, pero concluyó: «La reconozco cuando la veo».

Además, probablemente será ilegal que los robots sustituyan el sistema judicial, ya que nuestras leyes mantienen celosamente un principio fundamental: los jurados deben estar constituidos por nuestros pares. Dado que los robots no pueden ser nuestros pares, sería ilegal que asumieran el sistema judicial.

A primera vista, las leyes pueden parecer exigentes y bien definidas, con una formulación rigurosa y precisa, y títulos y definiciones que suenan como un arcano. Pero esto es solo apariencia, ya que las interpretaciones de esas definiciones varían constantemente. La Constitución de Estados Unidos, por ejemplo, parece un documento claramente definido y, sin embargo, el Tribunal Supremo está siempre dividido por la mitad en cuestiones controvertidas. Continuamente está reinterpretando cada palabra y cada frase de la Constitución. La cambiante naturaleza de los valores humanos se puede ver fácilmente con solo echar una mirada a la historia. Por ejemplo, en 1857 el Tribunal Supremo de Estados Unidos dictaminó que los esclavos nunca podrían convertirse en ciudadanos estadounidenses. En cierto modo, fue necesario una guerra civil y miles de muertos para revocar aquella decisión.

El liderazgo será también un valor muy apreciado en el futuro. En parte, ejercer el liderazgo consiste en sopesar toda la información, los puntos de vista y las opciones disponibles, y luego elegir lo que sea más apropiado y coherente con ciertos objetivos. El liderazgo es especialmente complicado porque trata de inspirar y proporcionar orientación a los trabajadores humanos, que tienen sus propias fuerzas y debilidades. Todos estos factores requieren una sofisticada comprensión de la naturaleza humana, las fuerzas de mercado, etcétera, que está más allá de la capacidad de cualquier ordenador.

EL FUTURO DEL OCIO

Todo esto implica también que industrias enteras, tales como la del ocio, están experimentando un cambio profundo. Por ejemplo, la industria discográfica estuvo desde tiempos inmemoriales basada en músicos que iban de ciudad en ciudad o de pueblo en pueblo haciendo actuaciones en directo. Los artistas estaban constantemente en la carretera, instalando un día su escenario en un lugar y marchándose al día siguiente a otro pueblo. Era una vida dura, con escasas compensaciones económicas. Este modelo, que llevaba una eternidad existiendo, cambió bruscamente cuando Thomas Edison inventó el fonógrafo y cambió para siempre el modo de escuchar música. De repente, un cantante podía producir grabaciones, de las que se vendían millones, y obtener beneficios inimaginables anteriormente. En una sola generación, los cantantes de rock se convertirían en los

nuevos ricos de la sociedad. Las estrellas del rock, que podrían haber sido humildes camareros en una generación anterior, se convirtieron en ídolos venerados por los jóvenes.

Pero, lamentablemente, la industria discográfica ignoró las predicciones de los científicos, que preveían el día en que la música se enviaría fácilmente por internet, como un correo electrónico. La industria discográfica, en vez de establecer los requisitos básicos para ganar dinero vendiendo en línea, intentaron demandar a las empresas advenedizas que ofrecían música por una parte del precio de un CD. Esto fue como intentar poner puertas al campo. Esta negligencia es la causa del desastre que sufre ahora la industria discográfica.

(Pero lo bueno es que ahora cantantes desconocidos pueden llegar a lo más alto, sin tener que enfrentarse *de facto* a la censura de las grandes empresas discográficas. En el pasado, estos magnates de la música podían prácticamente decidir quién iba a ser la siguiente estrella del rock. Pero, en el futuro, las estrellas de la música podrán ser elegidas de una manera más democrática, a través de una tecnología y unas fuerzas de mercado que fomentan la difusión libre, y no por los ejecutivos de la industria discográfica).

Los periódicos se enfrentan también a un dilema similar. Tradicionalmente, la prensa ha podido confiar en un flujo continuo de ingresos procedentes de los anunciantes, sobre todo en la sección de anuncios clasificados. El flujo de ingresos no se producía tanto por la venta del ejemplar en papel como por los ingresos de la publicidad que estas páginas generaban. Pero, ahora, podemos descargar gratuitamente las noticias del día y publicar anuncios de alcance nacional en toda una variedad de sitios en línea que admiten publicidad. En consecuencia, todos los periódicos del país están reduciéndose en tamaño y circulación.

Pero este proceso continuará solo hasta cierto punto. En internet hay tal cantidad de falsos profetas que arengan diariamente a su audiencia y megalómanos promotores de ideas absurdas que finalmente la gente apreciará una nueva oferta: la sensatez. Los hechos fortuitos no concuerdan con la sensatez, y en el futuro la gente se cansará de las peroratas de blogueros locos y buscará sitios respetables que ofrezcan esa rara mercancía que es la sensatez.

Como ha dicho el economista Hamish McRae: «En la práctica, el grueso de esta “información” es bazofia, el equivalente intelectual de los correos basura[10]». Pero afirma: «El buen juicio seguirá estando altamente valorado. Los analistas financieros que aciertan son, en conjunto, los investigadores mejor pagados del mundo».

MATRIX

¿Y qué pasa con los actores de Hollywood? En vez de convertirse en celebridades taquilleras y en la comidilla de la sociedad, ¿acabarán los actores en la cola del

desempleo? Recientemente se han producido notables progresos en las animaciones del cuerpo humano realizadas mediante ordenador, hasta tal punto que parecen casi reales. Los personajes de los dibujos animados tienen ahora características tridimensionales y sombreado. ¿Hará esto que los actores y las actrices dentro de poco queden obsoletos?

Probablemente, no. Al modelar el rostro humano mediante un ordenador surgen varios problemas fundamentales. Los seres humanos desarrollamos hace mucho tiempo una misteriosa habilidad para distinguir los rostros de unos y otros, ya que nuestra supervivencia dependía de ello. En un abrir y cerrar de ojos teníamos que decir si alguien era un enemigo o un amigo. Necesitábamos determinar en cuestión de segundos la edad, el sexo, la fuerza y el estado emocional de una persona. Los que no eran capaces de hacerlo, sencillamente no sobrevivían para transmitir sus genes a la generación siguiente. Por lo tanto, el cerebro humano dedica una porción considerable de su potencia procesadora a leer el rostro de la gente. De hecho, durante la mayor parte de nuestra historia evolutiva, antes de aprender a hablar, nos comunicábamos mediante gestos y lenguaje corporal, y una gran porción de nuestra potencia cerebral se dedicaba a buscar sutiles señas en el rostro de los demás. Pero a los ordenadores, si ya les cuesta mucho reconocer los objetos sencillos que tienen a su alrededor, aún les resulta más difícil recrear un rostro humano animado que sea realista. Los niños saben inmediatamente si el rostro que ven en la película es real o es una simulación del ordenador. (Esto tiene que ver con el Principio del Hombre de las Cavernas. Si nos dan a elegir entre ver una superproducción donde actúa nuestro actor favorito en vivo o ver una película de dibujos animados realizada por ordenador, siempre preferiremos la primera).

En cambio, el cuerpo es mucho más fácil de modelar mediante un ordenador. Cuando Hollywood crea en sus películas esos monstruos tan realistas y otros personajes de fantasía, lo que hace es usar un truco para facilitar las cosas. Un actor se pone un traje ceñido a la piel que tiene unos sensores en las costuras. Cuando el actor se mueve o baila, los sensores envían señales al ordenador, y este crea entonces una figura animada que realiza exactamente los mismos movimientos. Así se hizo en la película *Avatar*.

Una vez hablé en un congreso patrocinado por el Laboratorio Nacional Livermore, donde se diseñan armas atómicas, y durante la cena me senté junto a alguien que había trabajado en la película *Matrix*. Me confesó que había necesitado una enorme cantidad de horas de ordenador para crear los asombrosos efectos especiales de la película. Dijo que una de las escenas más difíciles precisó la reconstrucción completa de una ciudad imaginaria que era sobrevolada por un helicóptero. Con tiempo suficiente podía crear en el ordenador toda una ciudad de fantasía. Sin embargo, admitía que modelar un rostro humano realista desbordaba sus capacidades. La razón de esto era que, cuando un rayo de luz incide sobre el rostro humano, la luz se dispersa en todas las direcciones, dependiendo de su textura. El

ordenador ha de hacer un seguimiento de cada partícula luminosa. Por lo tanto, cada punto de la piel de un rostro humano se ha de describir mediante una compleja función matemática, lo cual es un auténtico mareo para cualquier programador informático.

Le comenté que aquello me recordaba mucho a la física de altas energías, que es mi especialidad. En nuestros aceleradores de partículas creamos un potente rayo de protones que se lanza contra un objetivo, produciendo una lluvia de fragmentos que se dispersan en todas las direcciones. Entonces introducimos una función matemática (llamada factor de forma) que describe cada partícula.

Medio en broma, pregunté si había alguna relación entre el rostro humano y la física de partículas o de altas energías. Sí, me contestó. Los animadores informáticos, para crear los rostros que vemos en las pantallas, utilizan el mismo formalismo que se usa en la física de altas energías. Nunca me habría figurado que las fórmulas arcanas que utilizamos los físicos teóricos pudieran algún día resolver el problema de modelar el rostro humano. Así pues, el hecho de que podamos reconocer el rostro de nuestros semejantes, ¡es similar al modo en que los físicos analizamos las partículas subatómicas!

EL FUTURO LEJANO (DESDE 2070 HASTA 2100)

EL IMPACTO SOBRE EL CAPITALISMO

Las nuevas tecnologías que se han comentado en este libro son tan poderosas que, a finales de siglo, será inevitable que produzcan un impacto en el capitalismo. Las leyes de la oferta y la demanda son las mismas, pero el auge de la ciencia y de la tecnología ha modificado el capitalismo de Adam Smith de muy diversas maneras, desde el modo en que se distribuyen las mercancías hasta la propia naturaleza de la riqueza. Algunos de los aspectos más inmediatos en que se ha visto afectado el capitalismo son los siguientes:

- **Capitalismo perfecto**. El capitalismo de Adam Smith está basado en las leyes de la oferta y la demanda: los precios se estabilizan cuando la oferta de un producto coincide con la demanda. Si un producto es escaso y tiene demanda, su precio aumenta. Sin embargo, el consumidor y el productor conocen la oferta y la demanda solo de una manera parcial e imperfecta, por lo que los precios pueden variar ampliamente de un lugar a otro. Por lo tanto, el capitalismo de Adam Smith era imperfecto. Ahora bien, esto irá cambiando gradualmente en el futuro.

Existe un «capitalismo perfecto» cuando el productor y el consumidor poseen un conocimiento infinito del mercado, de modo que los precios estén perfectamente determinados. Por ejemplo, en el futuro los consumidores explorarán internet mediante sus lentes de contacto y tendrán un conocimiento infinito y comparativo de todos los precios y calidades. Actualmente ya se puede buscar en internet para encontrar los mejores precios de los vuelos que ofrecen las compañías aéreas. Algún día esto será aplicable a todos los productos que se venden en el mundo. Ya sea mediante gafas, pantallas murales o teléfonos móviles, los consumidores lo sabrán todo sobre cualquier producto. Por ejemplo, mientras andamos por el supermercado, examinaremos los distintos productos que se exponen y, usando internet en las lentes de contacto, valoraremos de forma inmediata si un producto es una ganga o no. La balanza se inclina a favor de los consumidores, porque estos sabrán al instante todo sobre cualquier producto: su historia, su informe de calidad, su precio en relación con otros, sus ventajas y sus inconvenientes.

El productor también tiene algún as guardado en la manga, como, por ejemplo, valerse de la prospección de datos para conocer los deseos y las necesidades del consumidor, y buscar en internet los precios de los productos. Esto le evita tener que utilizar la intuición a la hora de fijar los precios. Sin embargo, el consumidor es en general quien juega con ventaja, porque tiene al instante un conocimiento comparativo sobre cualquier producto y exige el precio más barato. El productor debe entonces reaccionar ante la demanda del consumidor, que varía constantemente.

- **De la producción en serie a la generalización de la producción personalizada**. En el sistema actual, los productos se crean mediante la producción en serie. Henry Ford dijo en una ocasión que el cliente podía comprar el Ford Modelo T en cualquier color, siempre que fuera negro. La producción en serie bajó los precios de manera drástica, reemplazando el viejo e ineficaz sistema de gremios y productos hechos a mano. La revolución informática cambiará todo esto.

  Hoy en día, si un cliente ve un traje que tiene un color y un estilo perfectos, pero no es de su talla, no hay venta. Pero, en el futuro, nuestras medidas tridimensionales exactas se almacenarán en nuestra tarjeta de crédito o en nuestra billetera. Si un traje, u otra prenda, no fuera de la talla que necesitamos, enviaríamos nuestras medidas por correo electrónico a la fábrica, y esta produciría de inmediato uno de la talla correcta. En el futuro todo nos sentará bien.

  La atención personal para todos los clientes es impracticable actualmente, ya que crear un nuevo producto para un solo cliente tiene demasiado coste. Sin embargo, cuando todo esté conectado a internet, incluida la fábrica, los

productos hechos expresamente para un cliente podrán fabricarse al mismo precio que los artículos producidos en serie.

- **La tecnología en serie como servicio público**. Cuando las tecnologías se difunden ampliamente, como es el caso de la electricidad y el del agua corriente, al final se convierten en servicios públicos. Como el capitalismo hará que bajen los precios y se incremente la competencia, estas tecnologías se venderán como servicios públicos, es decir, no nos preocupará de dónde vienen y pagaremos por ellas solo cuando deseemos utilizarlas. Lo mismo se puede decir de la actividad informática. La «informática en nube», o *cloud computing*, que se basa fundamentalmente en internet para la mayoría de las funciones informáticas, irá ganando popularidad de manera gradual. La informática en nube reduce la actividad informática a un servicio público, algo por lo que pagamos solo cuando lo necesitamos, y algo en lo que no pensamos cuando no nos hace falta.

  Esto difiere de la situación actual, en la que la mayoría de nosotros teclea, procesa textos o dibuja en un ordenador de mesa o portátil, y luego se conecta a internet cuando desea buscar información. En el futuro podremos hacer desaparecer el ordenador progresivamente y acceder a toda nuestra información de manera directa en internet, que luego nos cobrará por el tiempo transcurrido. Así, la informática se convierte en un servicio que se mide, igual que el agua y la electricidad. Viviremos en un mundo donde nuestros aparatos, muebles, ropas, etcétera, serán inteligentes, y les hablaremos cuando precisemos de servicios específicos. Las pantallas de internet estarán ocultas por todas partes, y los teclados se materializarán cuando los necesitemos. La función habrá sustituido a la forma, por lo que, paradójicamente, la revolución informática hará que el ordenador desaparezca entre las nubes.

- **Definir el tipo de cliente**. Históricamente, las empresas han puesto anuncios en los periódicos, en la radio, en la televisión, etcétera, a menudo sin tener ni la más remota idea del impacto que tenía su publicidad. Solo podían calcular la efectividad de su campaña examinando el aumento de las ventas. Sin embargo, en el futuro las empresas sabrán de forma casi inmediata cuánta gente ha descargado o mirado sus productos. Si nos hacen una entrevista en una emisora de radio de internet, por ejemplo, será posible determinar con exactitud cuántas personas nos han escuchado. Esto permitirá a las empresas dirigirse a su audiencia con especificaciones hechas a medida.

  (No obstante, todo esto plantea otra cuestión: el delicado asunto de la privacidad, que dará lugar a una de las grandes controversias del futuro. En el pasado preocupaba la posibilidad de que el ordenador hiciera posible la aparición del Gran Hermano. En la novela de George Orwell titulada *1984*, un

régimen totalitario se apodera de la Tierra, generando un futuro infernal en el que los espías están por todas partes, las libertades están completamente reprimidas, y la vida es una serie interminable de humillaciones. En algún momento, internet podría haber evolucionado hasta convertirse en una máquina de espiar omnipresente. Sin embargo, en 1989, tras el desplome del bloque soviético, la Fundación Nacional de la Ciencia abrió internet al público, y así lo que era un instrumento primordialmente militar se convirtió en una herramienta que une en red a las universidades e incluso a las entidades comerciales, lo cual desembocó finalmente en la enorme expansión de la red en la década de 1990. Hoy en día, no es posible un Gran Hermano. El problema real es el «pequeño hermano», es decir, los entrometidos, los delincuentes de poca monta, la prensa sensacionalista e incluso las empresas que utilizan la prospección de datos para averiguar nuestras preferencias personales. Como veremos en el capítulo siguiente, este es un problema que no desaparecerá, sino que evolucionará con el tiempo. Es más que probable que haya un eterno juego del gato y el ratón entre los creadores de programas informáticos destinados a proteger nuestra intimidad y los que crean programas para irrumpir en ella).

DEL CAPITALISMO DE MERCANCÍAS AL CAPITALISMO INTELECTUAL

Hasta ahora nos hemos limitado a preguntarnos cómo está modificando la tecnología el modo en que opera el capitalismo. Con todo el revuelo producido por los avances de las altas tecnologías, ¿qué impacto tiene esto sobre la naturaleza del capitalismo? Toda la confusión que está generando esta revolución puede resumirse en un concepto: la transición del capitalismo de mercancías al capitalismo intelectual.

En los días de Adam Smith, la riqueza se medía en mercancías o productos. Los precios de los productos fluctúan, pero, por término medio, han estado cayendo continuamente durante los últimos 150 años. Hoy en día nos tomamos un desayuno que el rey de Inglaterra no hubiera podido tomar hace 100 años. Manjares exóticos de todo el mundo se venden ahora normalmente en los supermercados. El descenso de los precios de los productos se debe a diversos factores, tales como una mejora en la producción en serie, el envasado, el transporte, la comunicación y la competencia.

(Por ejemplo, a los alumnos de enseñanza media de hoy les cuesta mucho entender por qué Colón arriesgó su vida y su salud por buscar una ruta comercial más corta para las especias de Oriente. ¿Por qué no podía simplemente ir al supermercado y comprar un poco de orégano? Lo que pasa es que en la época de Colón las especias y las hierbas aromáticas eran extremadamente caras. Eran muy apreciadas porque podían enmascarar el mal sabor de la carne podrida, que era algo frecuente, porque en

aquellos días no existían los frigoríficos. A veces, incluso los reyes y los emperadores tenían que tomar alimentos podridos para cenar. No había camiones, ni contenedores, ni barcos que tuvieran refrigeración para transportar las especias a través de los océanos). Esta es la razón por la que estos productos eran tan valiosos, y Colón arriesgó su vida para conseguirlos, aunque ahora se vendan por unos céntimos.

Lo que está sustituyendo el capitalismo de mercancías es el capitalismo intelectual. El capital intelectual incluye precisamente lo que los robots y la IA no pueden proporcionar aún, es decir, el reconocimiento de patrones y el sentido común.

Como ha dicho Lester Thurow, economista del MIT: «Actualmente, el conocimiento y las destrezas son las únicas fuentes de beneficio comparativo. […] Silicon Valley y Route 128 están donde están simplemente porque es ahí donde se encuentra la capacidad intelectual. No hay ninguna otra razón[11]».

¿Por qué esta transición histórica está sacudiendo los cimientos del capitalismo? Muy sencillo, porque el cerebro humano no puede producirse en serie. Mientras los aparatos informáticos pueden fabricarse en serie y venderse por toneladas, no puede hacerse lo mismo con el cerebro humano, lo cual significa que el sentido común será la moneda de cambio del futuro. A diferencia de lo que sucede con los productos, para crear capital intelectual es preciso alimentar, cultivar y educar al ser humano, lo cual supone décadas de esfuerzo personal.

Como dice Thurow: «Mientras todo lo demás cae fuera de la ecuación competitiva, el conocimiento se ha convertido en la única fuente de beneficio competitivo y sostenible a largo plazo[12]».

Por ejemplo, el equipo lógico (programas informáticos, o *software*) llegará a ser, poco a poco, más importante que el soporte físico (*hardware*). Los chips informáticos se venderán por toneladas a medida que su precio vaya descendiendo, pero los programas informáticos han de ser creados al modo tradicional, es decir, por un ser humano que trabaja con lápiz y papel, sentado silenciosamente en una silla. Por ejemplo, los archivos almacenados en un portátil, que podría contener planificaciones valiosas, manuscritos y datos, pueden valer cientos de miles de dólares, pero el aparato en sí solo vale unos pocos cientos. Por supuesto, los programas informáticos pueden copiarse fácilmente y reproducirse en serie, pero la creación de nuevos programas no puede hacerse así. Necesita el pensamiento humano.

Según el economista del Reino Unido Hamish McRae: «En 1991 Gran Bretaña se convirtió en el primer país que había ganado más con las exportaciones invisibles (servicios) que con las visibles[13]».

Mientras que la parte de la economía estadounidense que procede de las manufacturas ha descendido drásticamente durante las últimas décadas, el sector basado en el capitalismo intelectual (películas de Hollywood, industria discográfica, videojuegos, ordenadores, telecomunicaciones, etc.) ha crecido vertiginosamente. Este cambio del capitalismo de mercancías al capitalismo intelectual es gradual y se inició durante el último siglo, pero sigue acelerándose en cada década que pasa.

Thurow, el economista del MIT, escribe lo siguiente: «Después de hacer la corrección necesaria, teniendo en cuenta la inflación general, los precios de los recursos naturales han caído casi un 60 por ciento desde mediados de la década de 1970 hasta mediados de la de 1990[14]».

Algunos países han sabido entender esto. Pensemos en la lección que nos ha dado Japón en el período posterior a la Segunda Guerra Mundial. Este país no posee grandes recursos naturales, pero su economía es una de las más potentes del mundo. La riqueza actual de Japón es el legado de la laboriosidad y la unidad de su pueblo más que de la riqueza que pueda haber bajo sus pies.

Desafortunadamente, muchos países no comprenden este hecho fundamental y no preparan a sus ciudadanos para el futuro, sino que confían principalmente en sus productos. Esto significa que los países que son ricos en recursos naturales y no comprenden este principio podrán hundirse en la pobreza en los tiempos venideros.

¿LO DIGITAL DIVIDE?

Algunas voces critican y quitan valor a la revolución de la información afirmando que se abrirá un abismo cada vez más amplio entre los «ricos digitales» y los «pobres digitales», es decir, entre aquellos que tienen acceso a la potencia de ordenador, y aquellos que no lo tienen. Dicen que esta revolución agrandará las líneas de fractura de la sociedad, generando nuevas diferencias y desigualdades económicas que pueden llegar a desgarrar el tejido social.

Pero esta es una versión reducida del auténtico problema. Dado que la potencia de ordenador se duplica cada dieciocho meses, incluso los niños de escasos recursos podrán acceder a los ordenadores. La presión de asemejarse a los demás y los precios baratos han impulsado el uso del ordenador y de internet entre los niños de escasos recursos. En un experimento se proporcionaron fondos para la adquisición de un portátil para cada aula. A pesar de las buenas intenciones, se estimó que el programa había sido en general un fracaso estrepitoso. En primer lugar, el portátil solía estar en un rincón y no se utilizaba, porque en muchos casos el profesor no sabía cómo usarlo. En segundo lugar, la mayoría de los alumnos estaban ya conectados en línea con sus amigos y simplemente pasaban del ordenador del aula.

El problema no está en la accesibilidad. El problema real son los puestos de trabajo. El mercado laboral está experimentando un cambio histórico, y los países que van a prosperar en el futuro serán aquellos que sepan obtener beneficio a partir de esto.

En el caso de los países en vías de desarrollo, una estrategia consiste en utilizar los productos para construir sólidos cimientos, y luego utilizar esos cimientos como trampolín para hacer la transición al capitalismo intelectual. China, por ejemplo, ha logrado implantar este proceso de dos fases: los chinos están instalando miles de

fábricas que producen artículos para el mercado mundial, pero están utilizando los beneficios para crear un sector de servicios basado en el capitalismo intelectual. En Estados Unidos, el 50 por ciento de los estudiantes universitarios de física han nacido en el extranjero (en gran medida porque Estados Unidos no produce entre sus propios ciudadanos un número suficiente de estudiantes cualificados). De estos universitarios nacidos en el extranjero, la mayoría proceden de China y la India. Algunos de estos estudiantes han regresado luego a sus países de origen para crear allí industrias totalmente innovadoras.

EMPLEOS DE NIVELES BÁSICOS

Una víctima de esta transición serán los empleos de niveles básicos. Cada siglo ha introducido nuevas tecnologías que han generado dolorosas dislocaciones en la economía y en la vida de las personas. Por ejemplo, en 1850 el 65 por ciento de la mano de obra estadounidense trabajaba en el campo. Actualmente, solo lo hace el 2,4 por ciento. El presente siglo dejará tras de sí fenómenos similares.

Durante el siglo XIX, nuevas oleadas de inmigrantes inundaron Estados Unidos, cuya economía crecía a una velocidad suficiente para absorberlos a todos. En Nueva York, por ejemplo, los inmigrantes podían encontrar trabajo en la confección de ropa o en la industria ligera. Con independencia de su formación, cualquier trabajador que deseara realizar un trabajo cotidiano honesto podía encontrar una ocupación en aquella economía que no dejaba de expandirse. Era como si una cinta transportadora llevara a los inmigrantes desde los guetos y los barrios bajos de Europa hasta introducirlos en la próspera clase media de Estados Unidos.

El economista James Grant ha dicho: «La prolongada migración de brazos y cerebros desde el campo a la fábrica, la oficina o el aula genera un crecimiento de la productividad. […] El progreso tecnológico es el bastión de la economía moderna. Esto ha sido así durante la mayor parte de los últimos doscientos años[15]».

Hoy en día, muchos de estos trabajos de niveles básicos han desaparecido. Además, la naturaleza de la economía ha cambiado. Numerosos empleos de niveles básicos se han desplazado a otros países, porque las empresas buscan mano de obra más barata. Los antiguos empleos fabriles han desaparecido hace tiempo.

Pero en esto hay una gran paradoja. Durante años, mucha gente ha pedido unas reglas de juego equitativas, sin favoritismos ni discriminación. Sin embargo, si los puestos de trabajo pueden exportarse pulsando un botón, las reglas de juego equitativas se extienden ahora a China o la India. Los empleos de niveles básicos que actuaban como una cinta transportadora hacia la clase media pueden ahora exportarse a otros lugares. Esto es muy bueno para los trabajadores de países extranjeros, porque pueden beneficiarse de esas reglas de juego equitativas, pero la consecuencia puede ser que algunas ciudades se queden vacías en Estados Unidos.

También el consumidor se beneficia de esto. Si existe una competencia global, los productos y los servicios se abaratan, y la distribución se vuelve más eficiente. Intentar simplemente el mantenimiento de empresas obsoletas y trabajos remunerados en exceso genera autocomplacencia, derroche e ineficiencia. Con la concesión de subsidios a empresas que van hacia la quiebra, no se consigue más que prolongar lo inevitable, retrasar el daño que va a producir el hundimiento y, en realidad, poner las cosas peor.

Hay otra paradoja. En el sector de los servicios, muchos puestos de trabajo cualificados y altamente remunerados quedan vacantes por falta de candidatos que tengan la cualificación requerida. A menudo, el sistema educativo no produce una cantidad suficiente de trabajadores cualificados, por lo que las empresas han de arreglárselas con mano de obra menos preparada. Las empresas andan mendigando trabajadores cualificados que el sistema educativo muchas veces no produce. Incluso en una situación de depresión económica hay puestos de trabajo que quedan sin ocupar por trabajadores cualificados.

No obstante, una cosa está muy clara. En una economía postindustrial muchos de los viejos puestos de trabajo que ocupaban los obreros en las fábricas han desaparecido definitivamente. A lo largo de los años, siempre ha habido economistas que han jugado con la idea de «reindustrializar Estados Unidos», hasta que se han dado cuenta de que no se puede hacer retroceder las manecillas del reloj. Estados Unidos y Europa realizaron hace décadas la transición de una economía en gran medida industrial a una economía de servicios, un histórico que no tiene marcha atrás. El apogeo de la industrialización ha pasado para siempre.

Por el contrario, hay que hacer esfuerzos para reorientar y reinvertir en aquellos sectores que maximizan el capitalismo intelectual. Esta será una de las tareas más difíciles que habrán de abordar los gobiernos en el siglo XXI, sin esperar soluciones rápidas y fáciles. Por una parte, implica una revisión importante del sistema educativo, con el fin de que los trabajadores puedan reconvertirse y los alumnos de los institutos no se cualifiquen para acceder a las filas del desempleo. El capitalismo intelectual no significa solo empleos para los programadores informáticos y los científicos, sino también puestos de trabajo en un amplio espectro de actividades que requieren creatividad, talento artístico, innovación, dotes para el liderazgo y capacidad de análisis (es decir, sentido común). La fuerza de trabajo ha de ser educada para afrontar los desafíos del siglo XXI, no para eludirlos. En particular, los programas de los estudios de ciencias han de ser revisados, y los profesores han de reciclarse para ser útiles a la sociedad tecnológica del futuro. (Es triste que en Estados Unidos siga vigente el viejo dicho: «El que puede, actúa, y el que no, enseña»).

Como ha dicho Lester Thurow, economista del MIT: «El éxito o el fracaso dependen de si un país está logrando o no realizar la transición hacia las industrias futuras, que requerirán la capacidad intelectual desarrollada por el hombre, y no dependerán del tamaño de ningún sector particular[16]».

Esto significa producir una nueva hornada de empresarios innovadores que deseen crear nuevas industrias y nueva riqueza a partir de estas innovaciones tecnológicas. Es preciso liberar la energía y la vitalidad de estas personas. Se les ha de permitir que incorporen un nuevo liderazgo al mercado.

PAÍSES GANADORES Y PAÍSES PERDEDORES

Lamentablemente, muchos países no están tomando este camino, sino que confían exclusivamente en el capitalismo de mercancías. Ahora bien, dado que los precios de los productos, por término medio, han estado bajando durante los últimos 150 años, sus economías con el tiempo acabarán por hundirse, cuando el mundo prescinda de ellas.

Este proceso no es inevitable. Basta con mirar los ejemplos de Alemania y Japón en 1945, cuando toda su población estaba a punto de morir de hambre, sus ciudades habían quedado reducidas a ruinas, y sus gobiernos se habían derrumbado. En solo una generación fueron capaces de ponerse al frente de la economía mundial. Veamos lo que pasa hoy en China, con su galopante tasa de crecimiento, que se sitúa entre el 8 y el 10 por ciento, invirtiendo 500 años de decadencia económica. El país que en otro tiempo recibía el burlón apelativo del «enfermo de Asia», en una generación más se incorporará a las filas de los países desarrollados.

Lo que caracteriza a estas tres sociedades es que en cada una de ellas había cohesión como nación y unos ciudadanos muy trabajadores, y que fabricaban productos que todo el mundo se apresuraba a comprar. Estos países pusieron el énfasis en la educación, en unificar su territorio y su población, y en el desarrollo económico.

Como escribió el economista y periodista británico McRae: «Los viejos motores del crecimiento (la tierra, el capital y los recursos naturales) ya no tienen importancia[17]. La tierra significa poco, ya que el aumento del rendimiento agrícola ha posibilitado la producción de una cantidad de alimentos muy superior a la que necesita el mundo industrial. El capital ya no importa, porque, pagando cierto precio, está disponible en los mercados internacionales en cuantías casi infinitas para financiar proyectos que sean rentables. […] Estos activos cuantitativos, que tradicionalmente han hecho ricos a los países, están siendo sustituidos por una serie de características cualitativas, que se reducen a la calidad, la organización, la motivación y la autodisciplina de los habitantes del país. Esto es evidente si observamos cómo el nivel de cualificación del ser humano se está volviendo cada vez más importante en la industria, en los servicios del sector privado y también en el sector público».

Sin embargo, no todos los países siguen este camino. Algunos están gobernados por líderes incompetentes, se encuentran fragmentados cultural y étnicamente hasta el

punto de llegar a la disfunción, y no producen los bienes que el resto del mundo desea adquirir. En vez de invertir en educación, invierten en grandes ejércitos y armas para aterrorizar a su pueblo y mantener sus privilegios. En lugar de invertir en infraestructuras para acelerar la industrialización de su país, caen en la corrupción y dedican sus esfuerzos a mantenerse en el poder, generando una cleptocracia, y no una meritocracia.

Lamentablemente, estos gobiernos corruptos han despilfarrado gran parte de la ayuda procedente de Occidente, por poca que esta fuera. Los futurólogos Alvin y Heidi Toffler señalan que, entre 1950 y 2000, los países ricos invirtieron más de un billón de dólares en ayudas a los países pobres. Pero añaden: «El Banco Mundial afirma que casi 2.800 millones de personas (prácticamente la mitad de la población del planeta) viven todavía con el equivalente a dos dólares o menos al día. De estos, aproximadamente 1.100 millones sobreviven en una pobreza extrema o absoluta con menos de un dólar diario[18]».

Por supuesto, los países desarrollados pueden hacer mucho más para aliviar la difícil situación de los países en vías de desarrollo en vez de tener una actitud hipócrita ante el problema. Pero, dicho esto, la responsabilidad principal con respecto al desarrollo debe ser asumida en definitiva por los propios países en vías de desarrollo, que han de dotarse de líderes sensatos. Se trata aquí del viejo dicho: «Dame un pez y comeré un día. Enséñame a pescar y comeré siempre». Esto significa que, en vez de simplemente conceder ayudas a los países en vías de desarrollo, es preciso poner el énfasis en la educación y en ayudarles a desarrollar nuevas industrias para que puedan llegar a ser autosuficientes.

SACAR PROVECHO DE LA CIENCIA

Los países en vías de desarrollo pueden sacar provecho de la revolución de la información. En principio, en muchas áreas podrían saltar por encima de los países desarrollados. En el mundo desarrollado, las compañías telefónicas tienen que conectar todos los hogares o granjas, y eso comporta grandes costes. Sin embargo, un país en vías de desarrollo no necesita cablear todo el territorio, ya que la tecnología del teléfono móvil puede hacer maravillas en las zonas rurales que no disponen de carreteras ni de otras infraestructuras.

Además, los países en vías de desarrollo tienen la ventaja de que no han de reconstruir unas infraestructuras envejecidas. Por ejemplo, las redes del metro de Nueva York y Londres tienen más de un siglo y necesitan reparaciones urgentes. Hoy en día, renovar esos sistemas decrépitos costaría más que construir uno nuevo, igual que el original. Un país en vías de desarrollo puede decidir crear una red de metro totalmente nueva con la tecnología más moderna, sacando provecho de todos los

avances en metales, técnicas de construcción y tecnologías. Un sistema de metro completamente nuevo puede costar mucho menos que los sistemas de hace un siglo.

China, por ejemplo, puede beneficiarse de todos los errores cometidos por Occidente al construir una ciudad desde sus cimientos. Como resultado de esto, Pekín y Shanghai se están construyendo por una fracción del coste original de construir una ciudad importante en Occidente. En la actualidad, Pekín está construyendo uno de los sistemas de metro más amplios y modernos del mundo, beneficiándose de la tecnología informática creada en Occidente, con el fin de atender las necesidades de una población urbana que crece rápidamente.

Internet es otra ruta para que los países en vías de desarrollo tomen un atajo hacia el futuro, evitando los errores cometidos por Occidente, especialmente en el campo de las ciencias. Antes, los científicos del mundo desarrollado tenían que confiar en un primitivo sistema postal para recibir revistas científicas, que solían llegar meses o incluso un año después de su publicación, si es que llegaban alguna vez. Aquellas revistas eran caras y altamente especializadas, por lo que solo las bibliotecas más importantes podían permitírselas. Colaborar con un científico de Occidente era casi imposible. Había que ser muy rico, o bien extremadamente ambicioso, para obtener un puesto en una universidad occidental y trabajar a las órdenes de un científico famoso. Ahora, incluso al científico más desconocido le es posible disponer de publicaciones científicas menos de un segundo después de que hayan sido publicadas en internet, y eso desde casi cualquier lugar del mundo, y, además, de manera gratuita. Asimismo, a través de internet es posible colaborar con científicos de Occidente a los que no conocemos personalmente.

EL FUTURO ESTÁ A NUESTRA DISPOSICIÓN

El futuro está abierto de par en par. Como ya se ha dicho antes, Silicon Valley podría convertirse en un simple cinturón industrial durante las próximas décadas, cuando la era del silicio se acabe y se pase la antorcha al próximo innovador. ¿Cuáles serán los países que lideren el futuro? En los días de la guerra fría, las superpotencias eran aquellos países que podían ejercer su influencia militar en todo el mundo. Pero el desmoronamiento de la Unión Soviética ha dejado claro que en el futuro los países que ascenderán a la cima serán aquellos que construyan bien sus economías, lo cual a su vez dependerá de que cultiven y alimenten la ciencia y la tecnología.

Entonces, ¿quiénes serán los líderes del futuro? Los países que realmente entiendan este hecho. Por ejemplo, Estados Unidos ha mantenido su predominio en la ciencia y la tecnología, a pesar del hecho de que los estudiantes estadounidenses a menudo son los últimos en puntuación cuando se trata de materias esenciales como ciencias y matemáticas. Las puntuaciones de las pruebas de *Proficiency* de 1991, por ejemplo, pusieron de manifiesto que los estudiantes estadounidenses de trece años

obtenían el puesto número quince en matemáticas y el catorce en ciencias, superando por poco a los de Jordania, que se clasificaban en el decimoctavo lugar en ambas disciplinas. Las pruebas realizadas desde entonces anualmente confirman estos tristes resultados. (Hay que señalar también que esta clasificación se corresponde más o menos con el número de días que los estudiantes pasan en el centro de enseñanza. China, que se situaba en el primer puesto, tenía un promedio de 251 días lectivos al año, mientras que Estados Unidos daba un promedio de solo 178 días).

Parece un misterio que Estados Unidos, a pesar de estas pésimas cifras, siga teniendo una buena posición internacional en ciencia y tecnología. Pero el enigma se resuelve cuando constatamos que gran parte de los científicos que trabajan en Estados Unidos proceden de países extranjeros, en lo que se conoce como «fuga de cerebros». El país posee un arma secreta: el visado H1B, también llamado visado de los genios. Si alguien puede demostrar que tiene talentos o recursos especiales, o unos excelentes conocimientos científicos, podrá pasar la raya y conseguir un visado H1B. Este visado ha estado engrosando continuamente nuestras filas de científicos. Silicon Valley, por ejemplo, tiene aproximadamente un 50 por ciento de nacidos en el extranjero, muchos de ellos procedentes de Taiwan y la India. En todo el país, un 50 por ciento de los estudiantes universitarios de física han nacido en países extranjeros. En mi universidad, la Universidad de Nueva York, las cifras rondan el cien por cien de nacidos en el extranjero.

Algunos congresistas han intentado lograr la supresión del visado H1B porque, según afirman, quita empleos a los estadounidenses, pero no comprenden el auténtico papel que desempeña este visado. Habitualmente no hay estadounidenses cualificados para ocupar los puestos de máximo nivel de Silicon Valley, por lo que, a menudo, hemos visto que dichos puestos se quedan vacíos. Esta incomprensión se puso de manifiesto cuando el antiguo canciller Gerhard Schroeder intentó que se aprobara en Alemania una ley de inmigración similar al visado H1B, medida que fue rechazada por los que afirmaban que quitaría puestos de trabajo a los nativos alemanes. Una vez más, las voces críticas no comprendieron que muchas veces no hay alemanes para llenar esos puestos de alto nivel, que se quedan vacíos. Los inmigrantes del visado H1B no quitan puestos de trabajo, sino que crean industrias completamente nuevas.

Pero el visado H1B es tan solo una medida para llenar huecos. Estados Unidos no puede seguir viviendo de científicos extranjeros, muchos de los cuales, en cuanto mejora su situación económica, empiezan a regresar a China o a la India. Por lo tanto, la fuga de cerebros no es sostenible. Esto significa que Estados Unidos tendrá que revisar finalmente su arcaico y esclerótico sistema educativo. Actualmente, unos alumnos de enseñanza media pobremente preparados inundan el mercado de trabajo y las universidades, creando un verdadero bloqueo. Los empresarios se quejan continuamente por el hecho de que han de dedicar un año a preparar a sus nuevos contratados para ponerlos en marcha. Y las universidades soportan la carga de tener

que crear nuevos niveles de cursos de recuperación para compensar las carencias del sistema educativo en la enseñanza media.

Afortunadamente, nuestras universidades y empresas realizan al fin y al cabo un encomiable trabajo reparando el daño que hace el sistema de la enseñanza media, pero esto supone una pérdida de tiempo y de talento. Para que Estados Unidos siga siendo un país competitivo en el futuro, tendrá que haber cambios fundamentales en el sistema de la enseñanza elemental y media.

Para ser justos, he de decir que Estados Unidos tiene también ventajas significativas. En una ocasión asistí a un cóctel en el Museo Norteamericano de Historia Natural, en Nueva York, y conocí a un empresario del sector de la biotecnología procedente de Bélgica. Le pregunté por qué se había ido de su país, si Bélgica posee una potente industria biotecnológica. Él me respondió que a menudo en Europa no le dan a la gente una segunda oportunidad. Dado que todo el mundo sabe quiénes sois tú y tu familia, si cometes una equivocación, estás acabado. Los errores suelen perseguir a la persona que los ha cometido, con independencia de quién sea esta. Sin embargo, en Estados Unidos, decía el belga, un individuo puede reinventarse constantemente. A la gente no le importa quiénes fueron sus antepasados. Solo le importa lo que el individuo puede hacer por ellos ahora, en el presente. Esto resultaba reconfortante, afirmaba el empresario, y era una de las razones por las que algunos científicos europeos se trasladaban a Estados Unidos.

LA LECCIÓN DE SINGAPUR

En Occidente hay una expresión que dice: «La rueda que chirría consigue que la engrasen». Pero en Oriente hay otra expresión que reza: «El clavo que sobresale es el que se lleva el martillazo». Estas dos expresiones son diametralmente opuestas, pero captan algunas de las características esenciales del pensamiento occidental y oriental, respectivamente.

En Asia los estudiantes a menudo obtienen en las pruebas unas puntuaciones que destacan por encima de las de sus compañeros de Occidente. Sin embargo, gran parte de su aprendizaje es de libro y de memorizar maquinalmente, lo cual solo puede llevarles hasta cierto nivel. Para alcanzar los altos niveles de la ciencia y la tecnología, se necesita creatividad, imaginación e innovación, cosas que no fomenta el sistema oriental. Por consiguiente, aunque China pueda en definitiva llegar al nivel occidental en lo que a producir copias industriales baratas de artículos que se han fabricado por primera vez en Occidente se refiere, permanecerá durante décadas por detrás de los occidentales en los procesos creativos de soñar nuevos productos y nuevas estrategias.

En una ocasión hablé en un congreso celebrado en Arabia Saudí, donde otro de los ponentes era Lee Kuan Yew, primer ministro de Singapur entre 1959 y 1990. Este

hombre es una especie de estrella del rock entre los dirigentes de los países en vías de desarrollo, porque contribuyó a forjar la nación moderna que es ahora Singapur, que figura entre las naciones de mayor nivel científico. De hecho, Singapur es el quinto país más rico del mundo por lo que respecta al producto interior bruto per cápita. La audiencia se preparó para no perderse ni una sola palabra de lo que dijera esta figura legendaria.

Empezó recordando los primeros días posteriores a la guerra, cuando Singapur estaba considerada como un puerto remoto y atrasado, famoso fundamentalmente por la piratería, el contrabando, sus marineros borrachos y otras actividades infames. Sin embargo, un grupo de socios suyos soñaba con el día en que aquel pequeño puerto marítimo pudiera competir con Occidente. Aunque Singapur no tenía recursos naturales importantes, su mayor recurso era su propia gente, que era muy trabajadora y tenía cierta formación. El grupo de Lee Kuan Yew se embarcó en una empresa notable, haciéndose cargo de este país atrasado y somnoliento, y transformándolo en una potencia científica en el transcurso de una sola generación. Fue quizá uno de los casos de ingeniería social más interesantes de la historia.

Lee Kuan Yew y su partido iniciaron un proceso sistemático cuyo objetivo era revolucionar todo el país, poniendo énfasis en la ciencia y la educación, y concentrándose en las industrias de alta tecnología. En tan solo unas pocas décadas, Singapur creó una gran cantera de técnicos altamente cualificados, gracias a los cuales el país se convirtió en unos de los principales exportadores de electrónica, productos químicos y equipamiento biomédico. En 2006 produjo el 10 por ciento de la producción mundial de obleas de fundición para ordenadores.

Confesó que habían surgido numerosos problemas a lo largo del proceso de modernización de su país. Para instaurar el orden social, los gobernantes impusieron unas leyes draconianas que declaraban ilegal todo, desde escupir en la calle (punible con azotes) hasta el tráfico de drogas (punible con la muerte). Pero también señaló una cosa importante. Pensaba que los científicos de alto nivel estarían deseosos de visitar Singapur, pero solo unos cuantos permanecieron allí. Más tarde encontró la razón de aquello: no había amenidades y atracciones culturales que los retuvieran en Singapur. Esto le dio la idea siguiente: promover deliberadamente todos los beneficios marginales culturales de una nación moderna (compañías de ballet, orquestas sinfónicas, etc.), con el fin de que los científicos de máximo nivel se establecieran en Singapur. Casi de la noche a la mañana, las organizaciones y los acontecimientos culturales brotaron por todo el país como señuelo para mantener a la élite científica anclada allí.

A continuación, Lee Kuan Yew también se dio cuenta de que los niños de Singapur repetían sin pensar las palabras de sus profesores, con lo cual no desafiaban los conocimientos convencionales, ni creaban nuevas ideas. Constató que Oriente iría siempre detrás de Occidente si continuaba produciendo científicos que solo podían copiar a otros. Por consiguiente, puso en marcha una revolución dentro de la

enseñanza: los estudiantes creativos serían seleccionados, y se les permitiría perseguir sus sueños a su propio ritmo. Consciente de que Bill Gates o Steve Jobs habrían sido aplastados por el sofocante sistema de enseñanza de Singapur, pidió a los profesores que identificaran sistemáticamente a los futuros genios que podían revitalizar la economía utilizando su imaginación científica.

La lección de Singapur no vale para cualquier país. Se trata de una pequeña ciudad-estado donde un puñado de visionarios pudieron llevar a cabo la construcción controlada de una nación. Y conste que nadie quiere ser azotado por escupir en la calle. Sin embargo, esto nos muestra lo que se puede hacer si se desea sistemáticamente dar el salto a la primera línea de la revolución de la información.

UN DESAFÍO DE CARA AL FUTURO

En una ocasión pasé un tiempo en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton y almorcé con Freeman Dyson. Durante el almuerzo, este científico empezó a recordar su larga carrera en la ciencia y luego mencionó un hecho preocupante. Antes de la guerra, cuando era un joven universitario que estudiaba en el Reino Unido, descubrió que las mentes más brillantes de Inglaterra estaban dando la espalda a las ciencias más arduas, como la física y la química, prefiriendo carreras lucrativas en las finanzas y la banca. Mientras la generación anterior estaba creando riqueza en forma de plantas eléctricas y químicas, e inventando nuevas máquinas electromecánicas, la generación siguiente se entregaba a la placentera actividad de acariciar y gestionar el dinero de otros. Lamentó esto como un signo de la decadencia del Imperio británico. Inglaterra no podía mantener su estatus de potencia mundial si su base científica se estaba desmoronando.

A continuación, dijo algo que me llamó la atención.

Señaló que estaba viendo lo mismo por segunda vez en su vida. Las mentes más brillantes de Princeton no se dedicaban ya a abordar los difíciles problemas de la física y las matemáticas, sino que se sentían atraídos por carreras tales como la gestión de la banca de inversiones. De nuevo, pensó, podría ser un signo de decadencia el hecho de que los líderes de una sociedad no puedan apoyar los inventos y la tecnología que, en otro tiempo, hicieron grande a su sociedad.

Este es nuestro desafío de cara al futuro.

8

EL FUTURO DE LA HUMANIDAD

Una civilización planetaria



La gente de nuestro tiempo vive en medio de lo que podría considerarse como los tres o cuatro siglos más extraordinarios de la historia de la humanidad.

JULIAN SIMON

Donde no hay visión, la gente perece.

PROVERBIOS 29,18

LOS DIOSES MITOLÓGICOS vivían en el esplendor divino de los cielos, lejos de los insignificantes asuntos de los simples mortales. Los dioses griegos retozaban en los dominios celestiales del monte Olimpo, mientras que los dioses noruegos, que luchaban por el honor y la gloria eterna, festejaban en los sagrados salones del Valhala con los espíritus de los guerreros caídos en combate. Ahora bien, si nuestro destino es alcanzar el poder de los dioses a finales de siglo, ¿cómo será nuestra civilización en 2100? ¿Adónde nos llevarán todas esas innovaciones tecnológicas?

Todas las revoluciones tecnológicas de las que se ha hablado aquí conducen a una única meta: la creación de una civilización planetaria. Quizá se trate de la transición de mayor envergadura en toda la historia de la humanidad. De hecho, las personas que viven actualmente son las más importantes que han pisado nunca la superficie del planeta, porque ellas decidirán si alcanzamos ese objetivo o nos sumimos en el caos. De las 5.000 generaciones de seres humanos que han caminado sobre la Tierra, desde que aparecimos por primera vez en África hace unos 100.000 años, tal vez sean las que vivan en este siglo las que determinen en última instancia nuestro destino.

A menos que se produzca una catástrofe natural o algún acto de locura calamitoso, entraremos inevitablemente en esa fase de nuestra historia colectiva. La manera más clara de verlo es hacer un análisis de la historia de la energía.

CLASIFICAR LAS CIVILIZACIONES

Cuando los historiadores profesionales escriben la historia, la enfocan siempre a través de las lentes de la experiencia y la locura humanas, es decir, a través de las hazañas de reyes y reinas, del surgimiento de movimientos sociales y de la proliferación de las ideologías. Los físicos, por el contrario, ven la historia de una manera bastante diferente.

Los físicos clasifican todo, incluso las civilizaciones humanas, según la energía que se consume. Por lo que respecta a la historia humana, vemos que durante innumerables milenios nuestra energía estaba limitada a 1/5 de caballo de vapor, es decir, la potencia de nuestras manos desnudas, y con eso hemos vivido unas vidas nómadas, en pequeñas tribus errantes, buscando alimento en un entorno duro y hostil. Durante muchísimo tiempo, nuestro aspecto era tal que no se nos distinguía de los lobos. No había nada escrito, solo historias que se transmitían de generación en generación junto a los fuegos de campamento. La vida era breve y brutal, con una esperanza de vida media de entre dieciocho y veinte años. Los bienes que poseía un individuo eran lo que podía cargar sobre sus hombros. Durante la mayor parte de sus vidas sentían los dolorosos retortijones del hambre. Después de morir, las personas no dejaban rastro alguno que permitiera pensar que habían vivido alguna vez.

Sin embargo, hace 10.000 años se produjo un maravilloso suceso que puso a la civilización en movimiento: acabó la era glacial. Por razones que aún no comprendemos, miles de años de glaciación terminaron. Esto preparó el camino para el surgimiento de la agricultura. Los caballos y los bueyes no tardaron en ser domesticados, con lo que nuestra energía aumentó a 1 caballo de vapor. Así, una sola persona tenía energía suficiente para cultivar varios acres de tierras de labranza, produciendo un excedente de energía que bastaba para mantener una población que se expandía con gran rapidez. Con la domesticación de los animales, los seres humanos no dependían ya básicamente de la caza para conseguir alimento, por lo que los primeros pueblos y ciudades estables empezaron a surgir del bosque y de las llanuras.

El excedente de bienes generado por la revolución agrícola produjo nuevos e ingeniosos modos de mantener y aumentar estos bienes. Se inventaron las matemáticas y la escritura para contar los bienes, fueron necesarios los calendarios para estar al tanto de cuándo había que plantar y cosechar, y también hubo necesidad de escribir y llevar la contabilidad de este excedente y grabarlo con impuestos. El excedente de riqueza llevó finalmente a la aparición de grandes ejércitos, así como reinos, imperios, esclavitud y, en definitiva, las civilizaciones antiguas.

La revolución siguiente tuvo lugar hace unos 300 años, con la llegada de la revolución industrial. De repente, la riqueza acumulada por un individuo no era meramente lo que habían producido sus manos y su caballo, sino el producto de unas máquinas que podían crear unas riquezas fabulosas mediante la fabricación en serie.

Las máquinas de vapor podían poner en movimiento potentes máquinas y locomotoras, con lo cual no solo los campos, sino también las fábricas, telares y

minas podían crear riqueza. Los campesinos, huyendo de las hambrunas periódicas, cansados de romperse las espaldas trabajando los campos, emigraron en masa a las ciudades, creando la clase trabajadora industrial. Al cabo de un tiempo, los herreros y los constructores de carretas fueron reemplazados por los trabajadores de la industria automovilística. Con la llegada del motor de combustión interna, una sola persona podía manejar cientos de caballos de vapor. La esperanza de vida empezó a crecer y, en el año 1900, llegó a situarse en los cuarenta y nueve años en Estados Unidos.

Finalmente, hemos llegado a la tercera fase, en la cual la riqueza se genera a partir de la información. La riqueza de las naciones se mide ahora por los electrones que circulan por todo el mundo a través de cables de fibra óptica y satélites, y que acaban bailando en las pantallas de los ordenadores de Wall Street y de otras capitales financieras. La ciencia, el comercio y el ocio viajan a la velocidad de la luz, ofreciéndonos una información ilimitada en todo momento y en cualquier lugar.

CIVILIZACIONES DEL TIPO I, II Y III

¿Cómo continuará este crecimiento exponencial de la energía durante los próximos siglos y milenios? Cuando los físicos nos ponemos a analizar las civilizaciones, las clasificamos según la energía que consumen. Esta clasificación fue presentada por primera vez en 1964 por el astrofísico ruso Nikolái Kardashev, que estaba interesado en explorar el cielo nocturno a la búsqueda de señales enviadas por las civilizaciones avanzadas que pudieran existir en el espacio.

No le satisfacía algo tan nebuloso e indefinido como el concepto de «civilización extraterrestre», por lo que introdujo una escala cuantitativa para guiar el trabajo de los astrónomos. Se dio cuenta de que las civilizaciones extraterrestres podían diferenciarse por su cultura, su tipo de sociedad, su gobierno, etcétera, pero había algo a lo que todas tenían que obedecer: las leyes de la física. Y existía una cosa, observable y medible desde la Tierra, que podía clasificar a esas civilizaciones en distintas categorías: su consumo de energía.

En consecuencia, propuso tres tipos teóricos. Una civilización del tipo I es planetaria y consume la porción de luz solar que se proyecta sobre su planeta, es decir, aproximadamente 10^{17} vatios. Una civilización del tipo II es estelar y consume toda la energía que emite su sol, o sea, unos 10^{27} vatios. Una civilización del tipo III es galáctica y consume la energía de miles de millones de estrellas, lo que viene a ser unos 10^{37} vatios.

La ventaja de esta clasificación es que podemos cuantificar la potencia de cada civilización en vez de hacer vagas y desordenadas generalizaciones. Dado que conocemos la producción de energía de esos objetos celestiales, podemos asignar unos valores numéricos específicos a cada uno de ellos cuando exploramos los cielos.

Cada tipo difiere del otro en un factor de 10.000 millones: una civilización del tipo III consume 10.000 millones de veces más energía que una del tipo II (porque hay aproximadamente 10.000 millones, o más, de estrellas en cada galaxia), que a su vez consume 10.000 millones de veces más energía que una civilización del tipo I.

Según esta clasificación, nuestra civilización actual es del tipo 0. Ni siquiera ocupamos un lugar en esta escala, ya que obtenemos nuestra energía de plantas muertas, es decir, del petróleo y del carbón. (Carl Sagan, generalizando esta clasificación, intentó realizar una estimación más precisa del lugar en que nos clasificaríamos en esta escala cósmica. Sus cálculos mostraron que en realidad somos una civilización del tipo 0,7).

En esta escala podemos clasificar también las diversas civilizaciones que nos presenta la ciencia ficción. Una civilización del tipo I sería la de Buck Rogers o Flash Gordon, donde se han desarrollado por completo los recursos energéticos de todo un planeta. Los individuos de esta civilización pueden controlar todas las fuentes de energía planetarias, por lo que serían capaces de controlar o modificar el clima a voluntad, aprovechar la potencia de un huracán o tener ciudades en los océanos. Aunque recorren los cielos en cohetes, su producción de energía sigue estando, en gran medida, confinada en un planeta.

Una civilización del tipo II podría ser la Federación de Planetas de *Star Trek* (sin la propulsión por curvatura, o empuje *warp*), que es capaz de colonizar unas 100 estrellas cercanas. Su tecnología es prácticamente capaz de manipular toda la producción de energía de una estrella.

Una civilización del tipo III sería el Imperio en la saga *La guerra de las galaxias*, o quizá el Borg en la serie *Star Trek*, porque ambos han colonizado grandes porciones de una galaxia que abarca miles de millones de sistemas estelares. Pueden surcar las rutas del espacio galáctico a voluntad.

(Aunque la escala de Kardashev basa la clasificación en planetas, estrellas y galaxias, tendríamos que señalar como posible la existencia de una civilización del tipo IV, que obtiene su energía a partir de fuentes extragalácticas. La única fuente de energía que hemos encontrado más allá de nuestra galaxia es la energía oscura, que constituye el 73 por ciento de la materia y la energía del universo conocido, mientras que el mundo de las estrellas y las galaxias es solo el 4 por ciento del universo. Un posible candidato a civilización del tipo IV podría ser el omnipotente Q de la serie *Star Trek*, cuya energía es extragaláctica).

Existe la posibilidad de utilizar esta clasificación para calcular cuándo podríamos lograr cada uno de esos tipos. Se supone que la civilización mundial crece una tasa del 1 por ciento anual en términos de su PIB colectivo. Es una hipótesis razonable si se hace la media de los últimos siglos. Según dicha hipótesis, se tardaría aproximadamente 2.500 años en pasar de una civilización a la siguiente. Una tasa de crecimiento del 2 por ciento daría un período de transición de 1.200 años.

Asimismo, podemos calcular cuánto tardaría nuestro planeta en alcanzar la clasificación del tipo I. A pesar de todas las recesiones y expansiones económicas, de las épocas de auge y las de decadencia, podemos calcular matemáticamente que alcanzaremos la situación de tipo I en unos cien años, dada la tasa media de nuestro crecimiento económico.

DE LA CIVILIZACIÓN DEL TIPO 0 A LA DEL TIPO I

Cada vez que abrimos un periódico, vemos pruebas de que se está produciendo esa transición del tipo 0 al tipo 1. Muchos de los titulares pueden interpretarse como los dolores de parto de una civilización del tipo I que está naciendo ante nuestros ojos.

- Internet es el comienzo de un sistema telefónico planetario de tipo I. Por primera vez en la historia, una persona que está en un continente puede, sin esfuerzo alguno, intercambiar una cantidad ilimitada de información con alguien que se encuentra en otro continente. De hecho, ahora mucha gente siente que tiene más en común con alguien del otro extremo del planeta que con su vecino de al lado. Este proceso se acelerará en cuanto los estados pongan más cables de fibra óptica y lancen al espacio más satélites de comunicación. Además, el proceso es imparable. Si el presidente de Estados Unidos intentara prohibir internet, lo único que conseguiría sería provocar risas. Hoy en día hay casi mil millones de ordenadores personales en el mundo, y aproximadamente la cuarta parte de la humanidad ha navegado en internet al menos una vez.
- Unos cuantos idiomas, con el inglés a la cabeza, seguido por el chino, están emergiendo rápidamente como candidatos a ser el futuro idioma de la civilización del tipo I. En la World Wide Web, por ejemplo, un 29 por ciento de los visitantes navega en inglés, seguido por un 22 por ciento que lo hace en chino, un 8 por ciento en español, un 6 por ciento en japonés y un 5 por ciento en francés. El inglés es ya *de facto* la lengua planetaria de la ciencia, las finanzas, los negocios y el ocio. El inglés es la primera «segunda lengua» en el planeta. En cualquier lugar del mundo al que viaje, me encuentro con que el inglés ha emergido allí como *lingua franca*. En Asia, por ejemplo, cuando en una reunión participan vietnamitas, japoneses y chinos, todos ellos usan el inglés para comunicarse. Actualmente, en el planeta se hablan unas 6.000 lenguas, y se supone que el 90 por ciento de ellas desaparecerán en las próximas décadas, según Michael E. Krauss, del Centro de Lenguas Nativas de la Universidad de Alaska. La revolución de las telecomunicaciones está acelerando este proceso, ya que incluso personas que viven en las zonas más remotas del planeta están expuestas al inglés. Esto acelerará también el

desarrollo económico a medida que las sociedades a las que esas personas pertenecen se integren aún más en la economía mundial, elevando así su nivel de vida y su actividad económica.

Algunos lamentarán el hecho de que dejen de hablarse ciertas lenguas ancestrales. Sin embargo, por otra parte, la revolución informática garantizará que esas lenguas no se pierdan. Los hablantes nativos introducirán su lengua y su cultura en internet, donde estas permanecerán para siempre.

- Estamos siendo testigos del nacimiento de una economía planetaria. El desarrollo de la Unión Europea y de otros bloques comerciales representa la emergencia de una economía del tipo I. A lo largo de la historia, los pueblos de Europa han luchado a muerte en sangrientas confrontaciones con sus vecinos durante milenios. Incluso después de la caída del Imperio romano, las tribus siguieron masacrándose entre sí, llegando finalmente a convertirse en combativos estados europeos. Pero ahora esos feroces rivales se han asociado de repente para formar la Unión Europea, constituyendo así la mayor concentración de riqueza del planeta. La razón por la que esos estados han dejado a un lado repentinamente sus tradicionales rivalidades es que desean competir con el gigante económico constituido por las naciones que firmaron el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLC). En el futuro veremos cómo se forman nuevos bloques económicos, a medida que otros estados se den cuenta de que no pueden ser competitivos a menos que se integren en lucrativos bloques comerciales.

  Para ver un ejemplo gráfico de todo esto, no tenemos más que analizar la gran recesión de 2008. En cuestión de días, las ondas de choque que emitía Wall Street se propagaron a los centros financieros de Londres, Tokio, Hong Kong y Singapur. Hoy en día es imposible comprender la economía de un determinado Estado sin comprender las tendencias que afectan a la economía mundial.

- Estamos presenciando el surgimiento de una clase media planetaria. Cientos de millones de personas en China, la India y otros lugares están accediendo a las filas de la clase media, y esto es quizá la mayor revolución social de los últimos cincuenta años. Este grupo social es experto en las tendencias culturales, educativas y económicas que afectan al planeta. El foco de interés de esta clase media planetaria no son las guerras, la religión o un estricto código moral, sino la estabilidad política y social, así como los bienes de consumo. Las pasiones ideológicas y tribales que probablemente arrastraron a sus antepasados tienen escaso significado para ellos, porque su objetivo es poseer una casa en un buen barrio residencial y dos coches. Si sus antepasados tal vez celebraron el día en que sus hijos partieron a la guerra, ahora ellos se preocupan sobre todo por llevar a sus hijos a un buen colegio.

Por otra parte, en cuanto a las personas que observan con envidia cómo prosperan otros, lo que hacen es preguntarse cuándo les llegará el turno a ellos. Kenichi Ohmae, que fue socio mayoritario de McKinsey & Company, escribe: «Será inevitable que muchas personas empiecen a mirar a su alrededor y a preguntarse por qué no pueden tener lo que otros tienen. Igual de importante es que también se preguntarán por qué les fue imposible tenerlo en el pasado[1]».

- La economía, no las armas, es el nuevo criterio que define a una superpotencia. El desarrollo de la UE y el TLC pone de relieve una cuestión importante: con el final de la guerra fría, está claro que una potencia mundial puede mantener su posición dominante sobre todo mediante su poder económico. Entablar guerras atómicas es sencillamente demasiado peligroso, por lo que es el poder económico lo que determinará en gran medida el destino de los estados. Un factor que contribuyó al desmoronamiento de la Unión Soviética fue el esfuerzo económico de competir militarmente con Estados Unidos. (Según comentaron en una ocasión los asesores del presidente Ronald Reagan, la estrategia de Estados Unidos era agotar a Rusia hasta hundirla en una depresión económica, es decir, aumentar el gasto militar estadounidense hasta el punto en que los rusos, con una economía cuyo tamaño era menos de la mitad que la de Estados Unidos, tuvieran que dejar morir de hambre a su propia gente para estar a la altura de la otra potencia). Está claro que en el futuro una superpotencia solo puede mantener su posición mediante el poder económico, y este, a su vez, se deriva de la ciencia y la tecnología.
- Está emergiendo una cultura planetaria basada en la cultura de los jóvenes (rock and roll y moda joven), en el cine (las superproducciones taquilleras de Hollywood), en la moda de alta costura (artículos de lujo) y en la comida (cadenas de restaurantes de comida rápida en un mercado en serie). En cualquier lugar al que viajemos, podemos ver las mismas tendencias culturales en la música, las artes plásticas y la moda. Por ejemplo, Hollywood calibra cuidadosamente el atractivo global cuando calcula el éxito de una futura película taquillera. Las películas con temas interculturales (ya sean de acción o románticas), interpretadas por celebridades reconocidas internacionalmente, son las grandes fuentes de beneficios para Hollywood y ponen de manifiesto una cultura planetaria emergente.

  Vimos esto después de la Segunda Guerra Mundial, cuando, por primera vez en la historia de la humanidad, toda una generación de jóvenes disponía de ingresos suficientes para cambiar la cultura prevaleciente. Con anterioridad, se enviaba a los niños al campo a trabajar con sus padres en cuanto alcanzaban la pubertad. (Este es el origen de las vacaciones de tres

meses en verano. Durante la Edad Media, a los niños, en cuanto tenían edad para ello, se les imponía un trabajo muy duro en los campos durante el verano). Sin embargo, con una prosperidad ascendente, la generación de posguerra del *baby boom* dejó el campo para ir a las ciudades. Hoy en día vemos que, un país tras otro, todos van adoptando la misma pauta, mientras el desarrollo económico da poder a la juventud, dotándola de una amplia disponibilidad de ingresos. En definitiva, cuando la mayoría de la población mundial haya accedido a la clase media, esos ingresos cada vez más elevados llegarán a sus jóvenes, impulsando una perpetuación de esa cultura planetaria de la juventud. El *rock and roll*, las películas de Hollywood, etcétera, son, de hecho, unos claros ejemplos de cómo el capitalismo intelectual está sustituyendo al capitalismo mercantil. Durante décadas, en el futuro, los robots serán incapaces de crear unas músicas y unas películas que puedan emocionar a una audiencia internacional.

Lo mismo está sucediendo en el mundo de la moda, donde unas cuantas marcas están extendiendo su alcance a todo el planeta. La moda de alta costura, que en otro tiempo estuvo reservada a la aristocracia y a los extremadamente ricos, está proliferando con rapidez por todo el mundo a medida que más gente accede a la clase media y aspira a participar del glamour de los ricos. La moda de alta costura no es ya algo exclusivo de una élite privilegiada.

No obstante, el surgimiento de una cultura planetaria no significa que las culturas o las costumbres locales vayan a ser barridas del mapa. Al contrario, las personas serán biculturales. Por una parte, mantendrán vivas sus tradiciones culturales locales (e internet garantiza que esas costumbres regionales sobrevivan para siempre). La rica diversidad cultural de nuestro mundo continuará prosperando en el futuro. De hecho, algunas características poco conocidas de alguna cultura local pueden difundirse por todo el mundo a través de internet, que les proporciona una audiencia mundial. Por otra parte, la gente asimilará con facilidad las cambiantes tendencias que afectan a la cultura global. Cuando unas personas se comuniquen con otras de una cultura diferente, lo harán a través de la cultura global. Esto les ha sucedido ya a muchas élites del planeta: hablan su idioma local y siguen las costumbres locales, pero utilizan el inglés y se pliegan a costumbres internacionales cuando tratan con personas de otros países. Este es el modelo de la emergente civilización del tipo I. Las culturas locales seguirán prosperando, coexistiendo con esa cultura global de dimensiones mucho mayores.

- La información sobre la actualidad se está volviendo planetaria. Con la televisión por satélite, los teléfonos móviles, internet, etcétera, se hace imposible que un Estado controle la información y filtre las noticias. Las imágenes aún no editadas llegan de todas las partes del mundo, y están fuera

del alcance de los censores. Cuando estalla una guerra o una revolución, las duras imágenes se retransmiten instantáneamente por todo el mundo en tiempo real, según se están produciendo. En el pasado era relativamente fácil para las grandes potencias decimonónicas imponer sus valores y manipular las noticias. Hoy en día, esto sigue siendo posible, pero de una manera mucho más limitada, a causa de los avances tecnológicos. Además, dado que los niveles educativos están elevándose en todo el planeta, las noticias del mundo tienen una audiencia mucho más amplia. Actualmente, los políticos habrán de tener en cuenta la opinión mundial cuando piensen en las consecuencias de sus actuaciones.

- Los deportes, que en el pasado fueron esenciales para forjar una identidad primero tribal y luego nacional, están ahora forjando una identidad planetaria. El fútbol y las olimpiadas adquieren cada vez mayor relieve para dominar los deportes planetarios. Las olimpiadas de 2008, por ejemplo, fueron interpretadas por los chinos en gran medida como una fiesta de presentación en sociedad. La población china deseaba tomar su posición cultural de pleno derecho en el mundo, después de siglos de aislamiento. Esto es también un ejemplo del Principio del Hombre de las Cavernas, ya que los deportes son para nosotros algo muy cercano (*high touch*), pero están entrando en el mundo de las tecnologías avanzadas (*high tech*).
- También las amenazas medioambientales se están debatiendo a escala planetaria. Los estados son conscientes de que la contaminación que generan cruza las fronteras y puede provocar una crisis internacional. Vimos esto por primera vez cuando se abrió un agujero gigantesco en la capa de ozono sobre el Polo Sur. Dado que la capa de ozono impide que los perniciosos rayos X y ultravioletas procedentes del Sol lleguen a la superficie terrestre, los estados decidieron unirse para limitar la producción y el consumo de los clorofluorocarbonos utilizados en los frigoríficos y en algunos sistemas industriales. El Protocolo de Montreal se firmó en 1987 y logró reducir el uso de aquellos productos químicos que estaban destruyendo la capa de ozono. A partir de este éxito internacional, en 1997 la mayoría de los estados adoptaron el Protocolo de Kioto para enfrentarse a la amenaza del calentamiento global, que es un peligro aún mayor para el medio ambiente en nuestro planeta.
- El turismo es una de las industrias que están creciendo con mayor rapidez en el planeta. Durante la mayor parte de la historia de la humanidad, fue habitual que la gente viviera toda su vida dentro de un radio de unos pocos kilómetros en torno a su lugar de nacimiento. A los líderes sin escrúpulos les resultaba fácil manipular a su gente, que tenía poco o ningún contacto con las poblaciones de otros países. Sin embargo, hoy en día podemos recorrer el mundo con un reducido presupuesto. Los jóvenes mochileros de hoy, que se

alojan en albergues de la juventud por todo el planeta, serán los líderes de mañana. Algunas personas critican el hecho de que los turistas solo comprenden de la manera más superficial la cultura, la historia y la política del país que visitan. Pero hemos de comparar esto con lo que sucedía en el pasado, cuando el contacto entre culturas distantes era prácticamente inexistente, excepto en tiempos de guerra, a menudo con resultados trágicos.

- De manera similar, el abaratamiento de los viajes intercontinentales está acelerando el contacto entre pueblos diversos, haciendo que sea más difícil que se declaren guerras y difundiendo los ideales de la democracia. Uno de los principales factores que atizaban la animosidad entre los países era el hecho de que hubiera malentendidos entre los pueblos. En general es bastante difícil declarar la guerra a un país con el que tenemos una íntima familiaridad.
- La propia naturaleza de las guerras está cambiando como reflejo de esta nueva realidad. La historia muestra que dos democracias casi nunca se declaran la guerra. Casi todas las confrontaciones bélicas del pasado han tenido lugar entre países no democráticos, o entre una democracia y un país no democrático. En general, la fiebre guerrera puede atizarse fácilmente mediante la intervención de demagogos que demonizan al enemigo. Sin embargo, en una democracia, donde la prensa no calla, y hay partidos de la oposición, así como una clase media que se siente cómoda y corre el riesgo de perder todo en una guerra, la fiebre guerrera es mucho más difícil de cultivar. Sobre todo cuando hay una prensa escéptica y madres que exigen saber por qué sus hijos tienen que ir a la guerra.

Sin embargo, habrá guerras en el futuro. Como dijo en una ocasión el prusiano Carl von Clausewitz, experto en teoría militar: «La guerra es política, pero utilizando otros medios». Aunque todavía tendremos guerras, la naturaleza de estas irá cambiando a medida que la democracia se extienda por todo el mundo.

Hay otra razón por la que las guerras son cada vez más difíciles de emprender a medida que el mundo se vuelve más opulento y la gente tiene más que perder. El experto en teoría política Edward Luttwak ha escrito que ahora es mucho más difícil emprender una guerra porque hoy en día las familias son más reducidas. En el pasado una familia media tenía unos diez hijos; el mayor heredaba la granja, mientras que los hermanos más jóvenes se incorporaban a la Iglesia, al ejército o probaban fortuna en otro lugar. Actualmente, dado que una familia normal tiene una media de 1,5 hijos, no hay un excedente de hijos para cubrir fácilmente las necesidades del ejército o del sacerdocio. Por lo tanto, será mucho más difícil emprender una guerra, especialmente entre las democracias y las guerrillas del Tercer Mundo.

- Los estados se debilitarán, pero seguirán existiendo en 2100. Seguirán siendo necesarios para dictar leyes y resolver problemas locales. Sin embargo, su poder y su influencia se reducirán ampliamente en la medida en que los motores del crecimiento económico se vuelvan regionales, y luego globales. Por ejemplo, con el surgimiento del capitalismo a finales del siglo XVIII y principios del XIX, los estados fueron necesarios para implantar una moneda y un idioma comunes, así como leyes fiscales y regulaciones relativas al comercio y a las patentes. Las leyes y tradiciones feudales, que obstaculizaban el avance del libre comercio y de las finanzas, fueron eliminadas rápidamente por los gobiernos de los estados. Lo normal habría sido que este proceso durara más o menos un siglo, pero se produjo en una versión acelerada cuando Otto von Bismarck, el Canciller de Hierro, forjó el moderno Estado alemán en 1871. Del mismo modo, la marcha hacia una civilización del tipo I está cambiando la naturaleza del capitalismo, y el poder económico se está desplazando de manera gradual desde los gobiernos estatales hacia los poderes regionales y los grandes bloques económicos.

  Esto no significa necesariamente que vaya a haber un gobierno mundial. Hay muchos modos de hacer que pueda existir una civilización planetaria. Está claro que los gobiernos estatales perderán poder relativo, pero la naturaleza del poder que vaya a rellenar ese vacío dependerá de muchos factores históricos, culturales y nacionales que son difíciles de predecir.

- Las enfermedades serán controladas a nivel planetario. Antiguamente, las enfermedades virulentas no eran en realidad tan peligrosas porque la población humana era muy baja. El incurable virus Ébola, por ejemplo, es probablemente una enfermedad antigua que durante miles de años infectó solo a unos pocos poblados. Pero la rápida expansión de la civilización hacia zonas anteriormente deshabitadas y el auge de las ciudades hacen que un agente patógeno como el Ébola tenga que ser controlado con mucho rigor.

  Cuando la población de las ciudades pasó de varios cientos de miles a un millón, las enfermedades pudieron propagarse con rapidez y generar auténticas epidemias. El hecho de que la Peste Negra matara quizá a la mitad de la población europea fue, paradójicamente, un signo de progreso, en el sentido de que la población había alcanzado la masa crítica para las epidemias, y las rutas de navegación conectaban ciudades de todo el mundo.

  El reciente brote de la gripe H1N1 es también una medida de nuestro progreso. Tras originarse quizá en Ciudad de México, esta enfermedad se propagó rápidamente por todo el planeta mediante los viajes en avión. Pero es aún más importante el hecho de que para los estados del mundo fue solo cuestión de meses realizar la secuencia de los genes del virus y crear una vacuna que estuvo a disposición de decenas de millones de personas.

TERRORISMO Y DICTADURAS

No obstante, existen grupos que de manera instintiva se resisten al avance hacia una civilización planetaria del tipo I, porque saben que esta civilización es progresista, libre, científica, próspera y educada. Puede que estas fuerzas no sean conscientes de este hecho y no consigan articularlo, pero el hecho es que están luchando contra la tendencia hacia una civilización del tipo I. Estos grupos son:

- Los terroristas islámicos, que preferirían retroceder un milenio, hasta el siglo XI, en vez de vivir en el siglo XXI. No pueden formular su descontento de esta manera, pero, a juzgar por sus propias declaraciones, prefieren vivir en una teocracia donde la ciencia, las relaciones personales y la política están sometidas a unos edictos religiosos estrictos. (Olvidan que, históricamente, la grandeza y las proezas científicas y tecnológicas de la civilización islámica fueron equiparables a su tolerancia ante las nuevas ideas. Estos terroristas no comprenden cuál fue la auténtica fuente de la grandeza del pasado islámico.)
- Las dictaduras que dependen de mantener a su pueblo ignorante de la riqueza y el progreso del mundo exterior. Un ejemplo impactante fue el de las manifestaciones que agitaron Irán en 2009, cuando el gobierno intentó suprimir las ideas de los manifestantes, que usaron Twitter y YouTube en su pugna por trasladar su mensaje al mundo.

En el pasado, la gente decía que la pluma era más poderosa que la espada. En el futuro, será el chip lo que sea más poderoso que la espada.

Una de las razones por las que la población de Corea del Norte, un país terriblemente empobrecido, no se rebela es que se les niega cualquier contacto con el resto del mundo y, así, piensan que también la gente de otros países se muere de hambre. En parte, al no ser conscientes de que no tienen por qué aceptar su destino, consiguen soportar una situación increíblemente dura.

CIVILIZACIONES DEL TIPO II

Dentro de miles de años, cuando una sociedad alcance la categoría que llamamos tipo II, se convertirá en inmortal. Nada de lo que conoce la ciencia puede destruir una civilización del tipo II. Como esa civilización habrá aprendido a controlar el tiempo meteorológico, los períodos glaciales podrán evitarse o modificarse. También será posible desviar los meteoros y los cometas. Incluso si el Sol se convirtiera en una supernova, la gente podría huir a otro sistema estelar, o quizá evitar que su estrella explote. (Por ejemplo, si el Sol se convierte en una gigante roja, podrán hacer que

unos asteroides giren alrededor del planeta en un efecto honda, con el fin de llevar a la Tierra más lejos del Sol).

Un modo de que la civilización del tipo II pueda explotar toda la producción energética de una estrella es crear alrededor de ella una esfera gigantesca que absorba toda la luz solar de dicha estrella. Esta esfera recibe el nombre de esfera de Dyson.

Probablemente, una civilización del tipo II estará en paz consigo misma. Como los viajes espaciales son tan difíciles, habrá permanecido como civilización del tipo I durante siglos, lo cual le habrá dado mucho tiempo para eliminar las divisiones sociales internas. Cuando una civilización del tipo I pase a ser del tipo II, habrá colonizado no solo todo su sistema solar, sino también las estrellas más cercanas, situadas tal vez a varios cientos de años luz, pero no mucho más. Todavía sufrirán las restricciones que impone la velocidad de la luz.

CIVILIZACIONES DEL TIPO III

En la época en que una civilización alcance la categoría de tipo III, esa civilización habrá explorado ya la galaxia. El modo más adecuado de visitar los cientos de miles de millones de planetas es enviar sondas robóticas autorreplicantes por toda la galaxia. Una sonda de Von Neumann es un robot que puede hacer un número ilimitado de copias de sí mismo; aterriza en una luna (puesto que no se oxida ni erosiona) y con el polvo lunar monta una fábrica para crear miles de copias de sí mismo. Cada copia despega hacia otro sistema estelar lejano y, a su vez, hace miles de copias más. A partir de una de esas sondas, se puede crear rápidamente una esfera de billones de sondas autorreplicantes que se expande casi a la velocidad de la luz y cartografía toda la Vía Láctea en solo 100.000 años. Puesto que el universo tiene 13.700 millones de años de edad, ha habido tiempo suficiente para que esas civilizaciones hayan surgido (y desaparecido). (Ese crecimiento exponencial tan rápido coincide con el mecanismo que utilizan los virus para propagarse por nuestro cuerpo).

Sin embargo, hay otra posibilidad. Cuando una civilización ha alcanzado ya la categoría de tipo III, sus miembros tienen recursos energéticos suficientes para explorar la «energía de Planck», o sea, 10^{19} miles de millones de electronvoltios, que es la energía con la que el propio espacio-tiempo se vuelve inestable. (La energía de Planck es un trillón de veces la energía producida por nuestro mayor acelerador atómico, el Gran Colisionador de Hadrones que está a las afueras de Ginebra. Es la energía con la que finalmente falla la teoría de la gravedad de Einstein. Teóricamente, cuando se alcanza esta energía, el tejido del espacio-tiempo se desgarra, creando unas diminutas puertas que pueden llevar a otros universos, o a otros puntos del espacio-tiempo). Para aprovechar una energía tan enorme se necesitarían unas máquinas colosales a una escala inimaginable, pero, si se consiguiera esto, sería posible tomar

atajos a través del tejido del espacio y el tiempo, ya fuera comprimiendo el espacio, o pasando a través de los llamados agujeros de gusano. Suponiendo que esos seres de una civilización del tipo III logren superar diversos obstáculos teóricos y prácticos de gran dificultad tales como almacenar suficiente energía positiva y negativa, o eliminar inestabilidades, es concebible que puedan colonizar toda la galaxia.

Esto ha inducido a mucha gente a especular sobre la razón por la que no nos han visitado ellos a nosotros. «¿Dónde están?», preguntan las voces críticas.

Una respuesta posible es que quizá lo hayan hecho ya, pero nosotros seamos demasiado primitivos para darnos cuenta. La utilización de las sondas autorreplicantes de Von Neumann sería la manera más práctica de explorar la galaxia, y no tienen por qué ser enormes. Podrían tener solo unos cuantos centímetros de longitud, dados los revolucionarios adelantos que se darán en la nanotecnología. Podría ser que estuvieran a la vista, aunque nosotros no las reconozcamos, ya que quizá nos equivocamos al buscar el objeto, pensando en una enorme nave espacial que transporta alienígenas procedentes del espacio exterior. Es más que probable que la sonda sea totalmente automática, en parte orgánica y en parte electrónica, y que no contenga alienígenas de ninguna clase.

Si finalmente tuviéramos algún encuentro con alienígenas procedentes del espacio, podríamos llevarnos una sorpresa, porque quizá habrían alterado hace mucho tiempo sus características biológicas, haciendo uso de la robótica, la nanotecnología y la biotecnología.

Otra posibilidad es que se hayan autodestruido. Como ya hemos dicho, la transición del tipo 0 al tipo I es la más peligrosa, ya que, cuando vamos a hacerla, todavía tenemos el salvajismo, el fundamentalismo, el racismo, etcétera, que nos caracterizaban en el pasado. Es posible que algún día, cuando visitemos las estrellas, encontremos vestigios de civilizaciones del tipo 0 que han fracasado a la hora de hacer la transición al tipo I (por ejemplo, sus atmósferas pueden ser demasiado calientes o demasiado radiactivas para que en ellas exista vida).

PROGRAMA SETI (SEARCH FOR EXTRATERRESTRIAL INTELLIGENCE: BÚSQUEDA DE INTELIGENCIA EXTRATERRESTRE)

En los tiempos actuales, las personas seguramente no son conscientes de que avanzan hacia una civilización planetaria del tipo I. No hay una conciencia colectiva de que esta transición histórica se está produciendo. Si se hiciera una encuesta, se vería que algunas personas pueden ser vagamente conscientes del proceso de globalización, pero más allá de eso no hay una percepción consciente de que nos dirijamos hacia un destino específico.

Todo esto podría cambiar de repente si encontráramos pruebas de la existencia de vida inteligente en el espacio exterior. En ese caso, seríamos inmediatamente conscientes de nuestro nivel tecnológico en relación con la civilización extraterrestre encontrada. En particular, a los científicos les interesaría mucho saber qué tipos de tecnologías han dominado esa civilización.

Aunque no se puede saber con total seguridad, es probable que durante este siglo detectemos una civilización avanzada en el espacio, dados los rápidos progresos de nuestra tecnología.

Son dos las iniciativas que han hecho que esto sea posible. La primera es el lanzamiento de satélites específicamente diseñados para encontrar pequeños planetas rocosos extrasolares: los satélites COROT y Kepler. Se espera que el satélite Kepler identifique hasta 600 pequeños planetas similares a la Tierra. Una vez que esos planetas hayan sido identificados, el paso siguiente es centrarnos en la búsqueda de emisiones inteligentes procedentes de ellos.

En 2001, el multimillonario Paul Allen, de Microsoft, empezó a donar unos fondos, que ahora ascienden a más de 30 millones de dólares, para poner en marcha el programa SETI, que estaba estancado. Esto aumentará enormemente el número de radiotelescopios de la instalación de Hat Creek, situada al norte de San Francisco. La Allen Telescope Array, cuando esté en pleno funcionamiento, contará con 350 radiotelescopios, convirtiéndose en la instalación de radiotelescopios más avanzada del mundo. Mientras en el pasado los astrónomos han conseguido explorar poco más de 1.000 estrellas en su búsqueda de vida inteligente, la nueva Allen Array aumentará ese número multiplicándolo por mil, es decir, llegando a un millón de estrellas.

Aunque los científicos han buscado en vano, durante casi cincuenta años, señales procedentes de civilizaciones avanzadas, ha sido recientemente cuando estas dos iniciativas han dado al programa SETI un impulso que era muy necesario. Muchos astrónomos creen que el problema era únicamente la escasez de esfuerzos y recursos dedicados a este proyecto. Con esta inyección de nuevos recursos y nuevos datos, el programa SETI se está convirtiendo en un serio proyecto científico.

No es inconcebible que durante este siglo podamos detectar señales procedentes de alguna civilización inteligente que haya en el espacio. Seth Shostak, director del Instituto SETI en el Área de la Bahía de San Francisco, me habló sobre su esperanza de que en veinte años pueda entrar en contacto con una civilización extraterrestre inteligente. Esto puede ser un exceso de optimismo, pero se puede decir con seguridad que sería extraño que durante este siglo no detectáramos señales de otra civilización existente en el espacio.

Si se descubren señales emitidas por una civilización avanzada, este hecho constituiría uno de los hitos más importantes de la historia de la humanidad. Las películas de Hollywood se complacen en describir el caos que desencadenaría este acontecimiento, con unos profetas que nos dirían que el final está cerca y con unas demenciales sectas religiosas haciendo horas extraordinarias, etcétera.

Sin embargo, la realidad es más normal. No habrá razón para caer presas del pánico, ya que esa civilización quizá ni siquiera sepa que estamos espiando sus conversaciones. Pero, si lo supieran, sería difícil mantener conversaciones directas entre ellos y nosotros, dada la enorme distancia que nos separa. En primer lugar, podríamos tardar meses, o quizá años, en descifrar completamente el mensaje y, luego, evaluar la tecnología de esa civilización, para ver si encaja en la clasificación de Kardashev. En segundo lugar, la comunicación directa con ellos resultaría con toda probabilidad casi imposible, ya que la distancia entre nosotros y esa civilización sería de muchos años luz, es decir, habría demasiada distancia para establecer cualquier contacto directo. Por lo tanto, lo único que conseguiremos será observar esa civilización sin poder mantener conversación alguna. Sería un esfuerzo enorme montar unos radiotransmisores gigantescos que consiguieran enviar mensajes de respuesta a los alienígenas. De hecho, podrían pasar siglos antes de que sea posible una comunicación recíproca con esa civilización.

NUEVAS CLASIFICACIONES

La clasificación de Kardashev fue presentada en la década de 1960, cuando los físicos estaban preocupados por la producción energética. Sin embargo, con el espectacular ascenso de la potencia de los ordenadores, la atención se volvió hacia la revolución de la información, convirtiéndose el número de bits procesados por una civilización en un dato tan relevante como su producción energética.

Nos podemos imaginar, por ejemplo, una civilización extraterrestre en un planeta en el que los ordenadores son imposibles porque su atmósfera conduce la electricidad. En tal caso, cualquier dispositivo eléctrico daría lugar a un cortocircuito y saltarían chispas, por lo que únicamente son posibles los modelos más primitivos de aparatos eléctricos.

Cualquier dínamo u ordenador a gran escala se quemaría rápidamente. Podemos imaginarnos que una civilización como esa podría, en todo caso, controlar los combustibles fósiles y la energía nuclear, pero su población no tendría posibilidad alguna de procesar grandes cantidades de información. Les resultaría muy difícil crear algo parecido a internet o un sistema de comunicaciones planetarias, por lo que su economía y su progreso científico se quedarían atrofiados. Aunque fueran capaces de ascender en la escala de Kardashev, sin ordenadores lo harían muy lenta y penosamente.

Como consecuencia de esto, Carl Sagan introdujo otra escala, esta vez basada en el procesamiento de la información. Ideó un sistema en el que las letras del alfabeto, de la A a la Z, corresponden a información. Una civilización del tipo A es aquella que procesa solo un millón de datos de información, lo cual corresponde a una civilización que únicamente posee un lenguaje hablado y ninguno escrito. Si

recopilamos toda la información creada en la Grecia antigua y que ha sobrevivido hasta nuestros días, es decir, una información procedente de una sociedad que tuvo un lenguaje escrito y una literatura florecientes, obtendremos unos mil millones de bits, lo cual definiría una civilización del tipo C. Ascendiendo en esta escala, podemos calcular la cantidad de información que procesa nuestra sociedad actual. Una estimación considerada nos sitúa en una civilización del tipo H. Por consiguiente, la energía y el procesamiento de información de nuestra sociedad nos sitúan en una civilización del tipo 0,7H.

Durante los últimos años ha surgido otra preocupación: la contaminación y los residuos. La energía y la información no bastan para clasificar una civilización. De hecho, cuanta más energía consume y más información emite una civilización, más contaminación y residuos podría producir. No se trata de una cuestión meramente académica, ya que los residuos de una civilización del tipo I o II podrían ser suficientes para destruirla.

Una civilización del tipo II, por ejemplo, consume toda la energía que produce una estrella. Digamos que sus motores son eficientes al cincuenta por ciento, con lo que la mitad de los residuos que produce se emitirían en forma de calor. Esto es potencialmente desastroso, porque significa que la temperatura del planeta ascenderá hasta que este quede fundido. Imaginemos miles de millones de centrales eléctricas de carbón en un planeta como ese, emitiendo enormes cantidades de calor y gases que lo calientan hasta el punto de hacer la vida imposible.

De hecho, Freeman Dyson intentó encontrar una civilización del tipo II en el espacio exterior y, para ello, buscó objetos que emitieran fundamentalmente radiación infrarroja en vez de rayos X o luz visible. La razón de esto es que una civilización del tipo II, incluso si quisiera esconder su presencia ante miradas indiscretas creando una esfera alrededor de sí misma, no podría evitar una emisión residual de calor que la haría brillar como una brasa a causa de la radiación infrarroja. Por consiguiente, Dyson sugirió que los astrónomos buscaran sistemas estelares que produjeran principalmente luz infrarroja. Aun así, no se ha encontrado ninguno.

Ahora bien, esto plantea el problema de que cualquier civilización que permita un crecimiento incontrolado de su energía puede llegar al suicidio. En consecuencia, vemos que la energía y la información no son suficientes para garantizar la supervivencia de una civilización que asciende en la escala. Necesitamos una nueva escala que tenga en cuenta la eficiencia, los residuos, la emisión de calor y la contaminación atmosférica. Esta escala estaría basada en otro concepto llamado entropía.

CLASIFICACIÓN DE LAS CIVILIZACIONES SEGÚN LA ENTROPÍA

Lo ideal es una civilización que crezca en energía e información, pero lo haga con tanta sabiduría que su planeta no se vuelva insoportablemente caliente ni se inunde de residuos.

Esto se vio ilustrado muy gráficamente en la película de Disney *Wall-E batallón de limpieza*, donde se refleja un futuro lejano en el que hemos contaminado y degradado la Tierra hasta tal punto que solo podemos optar por huir del desastre y llevar una vida entregada al placer en cruceros espaciales de lujo que surcan el espacio exterior.

Es aquí donde las leyes de la termodinámica adquieren importancia. La primera ley de la termodinámica viene a decir simplemente que no podemos obtener algo a cambio de nada, es decir, que no hay barra libre. En otras palabras, la cantidad total de materia y energía del universo es constante. Pero, como hemos visto en el capítulo 3, la segunda ley es la más interesante y, de hecho, puede determinar en definitiva el destino de una civilización avanzada. De una manera simplificada, la segunda ley de la termodinámica dice que la cantidad total de entropía (desorden o caos) siempre aumenta. Esto significa que todas las cosas tienen su final; los objetos han de pudrirse, deteriorarse, oxidarse, envejecer o romperse. (Nunca vemos que *disminuya* la entropía total. Por ejemplo, nunca vemos que unos huevos fritos salgan de un salto de la sartén y vuelvan a meterse en sus cáscaras. Nunca vemos que en una taza de café los cristales de azúcar dejen de estar disueltos y vuelvan a la cucharilla. Estos sucesos son tan sumamente raros que la palabra «desdisolverse» no existe en castellano ni en ninguna otra lengua).

Así pues, si las civilizaciones del futuro producen energía ciegamente cuando ascienden a civilizaciones del tipo II o III, crearán tanto calor residual que su planeta se volverá inhabitable. La entropía, en forma de calor residual, caos y contaminación, destruirá esa civilización. De manera similar, si producen información talando bosques enteros y generando montañas de papel usado, la civilización quedará enterrada en sus propios residuos.

Tenemos que presentar todavía una escala más para clasificar civilizaciones. Se trata de dos tipos nuevos de civilización. El primero es el de una civilización «conservadora de la entropía», que utiliza todos los medios a su disposición para controlar el exceso de residuos y calor. Como su energía tiene que seguir creciendo exponencialmente, se da cuenta de que su consumo de energía puede cambiar el medio ambiente del planeta, haciendo que la vida sea imposible. La entropía o el desorden total producido por una civilización avanzada continuará creciendo inevitablemente. Pero la entropía total puede disminuir en nuestro planeta si usamos la nanotecnología y las energías renovables para eliminar los residuos y la ineficiencia.

La segunda civilización, una civilización «que derrocha entropía», continúa expandiendo su consumo de energía sin límite alguno. Al final, si el planeta donde reside se vuelve inhabitable, esa civilización podría intentar huir de sus excesos

extendiéndose a otros planetas. Pero el coste de crear colonias en el espacio exterior limitará su capacidad de expandirse. Si su entropía crece más rápido que su capacidad para expandirse a otros planetas, se enfrentará al desastre.

DE AMOS A CONSERVADORES DE LA NATURALEZA

Como ya hemos mencionado anteriormente, en tiempos remotos fuimos observadores pasivos del baile de la naturaleza, contemplando maravillados todos los misterios que nos rodeaban. Actualmente somos una especie de coreógrafos de la naturaleza, capaces de pellizcar sus fuerzas aquí y allá. Sin embargo, en 2100 nos convertiremos en amos de la naturaleza, capaces de mover objetos con el poder de la mente, de controlar la vida y la muerte, y alcanzar las estrellas.

Pero, si nos convertimos en amos de la naturaleza, también tendremos que ser sus conservadores. Si dejamos que la entropía aumente sin límite, pereceremos inevitablemente según las leyes de la termodinámica. Por definición, una civilización del tipo II consume tanta energía como una estrella y, por consiguiente, la temperatura en la superficie del planeta será abrasadora si se permite que la entropía aumente de manera constante. Pero siempre hay modos de controlar el aumento de la entropía.

Por ejemplo, cuando visitamos un museo y vemos las enormes máquinas de vapor del siglo XIX, con sus grandes calderas y carretadas de carbón, vemos lo ineficientes que eran, derrochando energía y generando enormes cantidades de calor y contaminación atmosférica. Si las comparamos con un silencioso e impecable tren eléctrico, vemos con cuánta más eficiencia se usa actualmente la energía. La necesidad de gigantescas centrales eléctricas de carbón que arrojan enormes cantidades de calor residual y contaminación al aire se puede reducir considerablemente si los aparatos que usa la gente son eficientes energéticamente mediante energías renovables y miniaturización. La nanotecnología nos da la oportunidad de reducir aún más el calor residual, si los aparatos se miniaturizan a escala atómica.

Además, si en este siglo se descubren los superconductores a temperatura ambiente, eso significará una revisión completa de nuestras necesidades de energía. Se reducirá enormemente el calor residual, en forma de fricción, aumentando la eficiencia de nuestras máquinas. Como ya hemos mencionado, la mayor parte de nuestro consumo de energía, especialmente por el transporte, se gasta en superar la fricción. Es la razón por la que ponemos gasolina en los depósitos, aunque casi no requiera energía trasladarse de California a Nueva York, si no hubiera fricción. Podemos imaginar que una civilización avanzada será capaz de realizar muchas más tareas con menos energía de la que usamos actualmente. Esto significa que podremos poner límites numéricos a la entropía producida por una civilización avanzada.

LA TRANSICIÓN MÁS PELIGROSA

La transición entre nuestra actual generación del tipo 0 y una futura generación del tipo I es quizá la mayor transición de la historia. Determinará si continuamos desarrollándonos y prosperando, o pereceremos a causa de nuestra propia insensatez. Se trata de una transición extremadamente peligrosa, porque todavía mantenemos todo el salvajismo bárbaro que caracterizó nuestra penosa salida del pantano. Basta con rascar un poco nuestro barniz de civilización para que surjan en todo su apogeo las fuerzas del fundamentalismo, del sectarismo, del racismo, de la intolerancia, etcétera. La naturaleza humana no ha cambiado mucho en los últimos 100.000 años, salvo por el hecho de que ahora disponemos de armas atómicas, químicas y biológicas para ajustarle las cuentas al prójimo.

Sin embargo, cuando hayamos realizado la transición a una civilización del tipo I, tendremos muchos siglos por delante para arreglar nuestras diferencias. Como hemos visto en capítulos anteriores, tener colonias en el espacio seguirá siendo carísimo en el futuro, por lo que no es probable que una parte significativa de la población terrestre se vaya a colonizar Marte o el cinturón de asteroides. Hasta que el diseño de cohetes totalmente diferentes de los actuales rebaje los costes o hasta que se construya el ascensor espacial, los viajes al espacio seguirán siendo una opción exclusiva para los gobiernos y los muy ricos. Para la mayoría de la población terrestre, esto significa que permanecerán en el planeta cuando alcancemos la categoría de civilización del tipo I.

LA BÚSQUEDA DE LA SABIDURÍA

Vivimos tiempos emocionantes. La ciencia y la tecnología están abriendo ante nosotros unos mundos que antes solo vislumbrábamos en sueños. Al mirar hacia el futuro de la ciencia, con todos sus desafíos y riesgos, veo una auténtica esperanza. Durante las próximas décadas descubriremos en relación con la naturaleza muchas más cosas que en toda la historia de la humanidad.

Pero no siempre ha sido así.

Recordemos las palabras de Benjamin Franklin, el último gran científico y estadista de Estados Unidos, cuando hizo una predicción no solo para el próximo siglo, sino también para los próximos mil años. En 1780 señalaba con pesar que, a menudo, los seres humanos actuaban entre sí como lobos, principalmente a causa de la agobiante carga que es sobrevivir en un mundo tan duro.

Escribió lo siguiente:

> “Es imposible imaginar a qué altura llegará en mil años el poder del hombre sobre la materia. Tal vez aprendamos cómo liberar a las grandes

> masas de la acción de la gravedad, y consigamos darles una levedad absoluta, para facilitar su transporte. La agricultura reducirá sus trabajos y multiplicará por dos su producción; todas las enfermedades podrán prevenirse o curarse mediante medios seguros, sin exceptuar ni siquiera la de la vejez, y nuestras vidas se alargarán a voluntad, incluso más allá del estándar antediluviano[2].

Lo escribió en una época en que los campesinos arañaban del suelo un exiguo sustento, y carros tirados por bueyes llevaban productos putrefactos al mercado, un tiempo en que plagas y hambrunas formaban parte de la vida cotidiana, y solo unos pocos afortunados vivían más de cuarenta años. (En Londres, en 1750, dos tercios de los niños morían antes de alcanzar la edad de cinco años). Franklin vivió una época en que no había esperanza alguna de que un día pudiéramos resolver esos viejos problemas. O, como Thomas Hobbes escribió en 1651, la vida era «solitaria, pobre, sucia, bestial y corta».

Pero ahora, mucho antes de los mil años que mencionaba Franklin, sus predicciones empiezan a hacerse realidad.

La fe en que, algún día, la razón, la ciencia y el intelecto nos liberarían de la opresión del pasado encontró eco en la obra del marqués de Condorcet, escrita en 1795, titulada *Bosquejo de un cuadro histórico de los progresos del espíritu humano*, que, según algunos, es la predicción más exacta de acontecimientos futuros que se ha escrito nunca. Condorcet hizo una amplia variedad de predicciones, todas bastante heréticas, pero todas se hicieron realidad. Predijo que las colonias del Nuevo Mundo se liberarían finalmente de Europa. Vaticinó el final de la esclavitud en todo el mundo. Predijo que las granjas aumentarían enormemente la cantidad y la calidad de los alimentos que producían. Auguró que la ciencia crecería rápidamente y beneficiaría a la humanidad. Predijo que nos liberaríamos de los pesados trabajos de la vida cotidiana y tendríamos más tiempo de ocio. Pronosticó que el control de la natalidad se generalizaría algún día.

En 1795 parecía imposible que estas predicciones se cumplieran.

Benjamin Franklin y el marqués de Condorcet vivieron ambos en una época en que la vida era corta y brutal, y la ciencia estaba todavía en sus primeros balbuceos. Observando desde el presente esas predicciones, podemos apreciar plenamente los rápidos avances que han realizado la ciencia y la tecnología, creando abundancia y riqueza suficientes para sacar a miles de millones de personas del salvajismo del pasado. Viendo retrospectivamente el mundo de Franklin y Condorcet, podemos constatar que, entre todas las creaciones de la humanidad, la más importante ha sido, con mucho, la creación de la ciencia. Esta nos ha sacado de las profundidades de la ciénaga y nos ha elevado al umbral de las estrellas.

Pero la ciencia no se detiene. Como se ha dicho con anterioridad, en 2100 tendremos el poder de los dioses mitológicos que en otro tiempo adorábamos y

temíamos. En particular, la revolución informática nos hará capaces de manipular la materia con nuestras mentes; la revolución biotecnológica nos dará la posibilidad de crear vida casi a voluntad y de ampliar la duración de nuestra existencia; y la revolución nanotecnológica nos dará el poder de cambiar la forma de los objetos e incluso crearlos a partir de la nada. Además, todo esto puede conducirnos finalmente a la creación de una civilización planetaria del tipo I. Por lo tanto, las generaciones que viven en el presente son las más importantes que han pisado la superficie terrestre, porque serán las que determinarán si alcanzamos la civilización del tipo I o caemos al abismo.

Sin embargo, la ciencia es en sí misma moralmente neutral. Es como una espada de doble filo. Un lado de la espada puede hacer cortes que acaben con la pobreza, la enfermedad y la ignorancia. Pero el otro filo puede hacer cortes en contra de las personas. La manera de blandir esta poderosa espada depende de la sabiduría de los que la manejan.

Como dijo Einstein en una ocasión: «La ciencia solo puede determinar lo que existe, pero no lo que existirá; y, más allá de su dominio, los juicios de valor siguen siendo indispensables». La ciencia resuelve algunos problemas solo para crear otros a un nivel superior.

Durante las dos guerras mundiales vimos el lado crudo y destructivo de la ciencia. El mundo presenció con horror cómo la ciencia podía acarrear ruina y devastación a una escala nunca vista con anterioridad, con la introducción del gas venenoso, la ametralladora, los bombardeos incendiarios de ciudades enteras y la bomba atómica. El salvajismo de la primera parte del siglo XX desencadenó una violencia que iba más allá de toda comprensión.

Pero la ciencia también permite a la humanidad reconstruir y resurgir encima de las ruinas generadas por la guerra, creando una paz y una prosperidad aún mayores para miles de millones de personas. El verdadero poder de la ciencia es que nos capacita y nos da facultades, ofreciéndonos más opciones. La ciencia magnifica el espíritu innovador, creativo y luchador de la humanidad, así como también nuestras deficiencias.

LA CLAVE DEL FUTURO: LA SABIDURÍA

Por consiguiente, la clave está en encontrar la sabiduría necesaria para blandir la espada de la ciencia. Como dijo el filósofo Immanuel Kant: «La ciencia es conocimiento organizado. La sabiduría es la vida organizada[3]». En mi opinión, la sabiduría es la capacidad de identificar las cuestiones fundamentales de nuestro tiempo, analizarlas desde muchos puntos de vista y perspectivas diferentes, y luego elegir el enfoque que sirve para ciertos objetivos y principios nobles.

En nuestra sociedad, la sabiduría es difícil de conseguir. Como dijo Isaac Asimov: «El aspecto más triste de la sociedad actual es que la ciencia es más rápida adquiriendo conocimientos que la sociedad adquiriendo sabiduría[4]». A diferencia de la información, no puede dispensarse a través de blogs y chats de internet. Como estamos ahogándonos en un océano de información, en la sociedad moderna el bien más preciado es la sabiduría. Sin sabiduría ni perspicacia, estamos destinados a vagar sin rumbo ni objetivo, con un sentimiento hueco, después de que la novedad de una información ilimitada se desgasta.

Pero ¿de dónde viene la sabiduría? En parte viene del debate democrático razonado e informado entre posiciones opuestas. A menudo este debate es desordenado, impropio y estridente, pero de los truenos y el humo emerge una perspectiva auténtica. En nuestra sociedad este debate surge en forma de democracia. Como señaló Winston Churchill en una ocasión: «La democracia es la peor forma de gobierno, si no se tienen en cuenta las otras formas que se han intentado de vez en cuando[5]».

Desde luego, la democracia no es fácil. Hay que trabajarla. George Bernard Shaw dijo: «La democracia es un artilugio que garantiza que no seremos gobernados mejor de lo que merecemos[6]».

Hoy en día, internet, con todos sus fallos y excesos, está emergiendo como un guardián de las libertades democráticas. Temas que en otro tiempo se debatían a puerta cerrada, se diseccionan y analizan ahora en mil sitios web.

Los dictadores viven con miedo a internet, aterrorizados por lo que pueda suceder si el pueblo se alza contra ellos. Así, en la actualidad la pesadilla de *1984* ha desaparecido, porque internet cambia de ser un instrumento del terror a ser un instrumento de la democracia.

Del ruidoso debate surge la sabiduría. Pero el modo más seguro de entablar un debate vigoroso y democrático es hacerlo a través de la educación, porque solo un electorado educado puede tomar decisiones sobre unas tecnologías que determinarán el destino de nuestra civilización. En última instancia, el pueblo decidirá por sí mismo hasta dónde se ha de llevar esa tecnología y en qué dirección tendría que desarrollarse, pero solo un electorado informado y educado puede tomar esas decisiones con sabiduría.

Lamentablemente, muchos ignoran los enormes desafíos con los que nos vamos a enfrentar en el futuro. ¿Cómo podemos generar nuevas industrias que sustituyan a las antiguas? ¿Cómo prepararemos a los jóvenes para el mercado del trabajo del futuro? ¿Hasta dónde hemos de impulsar la ingeniería genética en los seres humanos? ¿Cómo podemos renovar un sistema educativo disfuncional y decadente para hacer frente a los desafíos del futuro? ¿Cómo podemos enfrentarnos al calentamiento global y a la proliferación de armas nucleares?

La clave para una democracia es un electorado informado y educado que sea capaz de discutir los temas de actualidad de una manera racional y desapasionada. El

propósito de este libro es ayudar a iniciar el debate que determinará cómo se va a desarrollar este siglo.

EL FUTURO ES UN TREN DE MERCANCÍAS

En resumen, somos nosotros quienes hemos de crear el futuro. No hay nada escrito en una piedra. Como Shakespeare escribió en *Julio César*: «El fallo, querido Bruto, no está en las estrellas, sino en nosotros mismos…». O como dijo una vez Henry Ford, de una forma quizá menos elocuente: «La historia es más o menos una tontería[7]. Es tradición. Pero no queremos la tradición. Queremos vivir en el presente, y la única historia que vale para algo es la que estamos haciendo actualmente».

En consecuencia, el futuro es como un enorme tren de mercancías que circula a toda velocidad, siguiendo nuestra ruta. Detrás de este tren quedan el sudor y el trabajo de miles de científicos que están inventando el futuro en sus laboratorios. Se puede oír el pitido del tren. Dice: biotecnología, inteligencia artificial, nanotecnología y telecomunicaciones. Sin embargo, algunos reaccionan diciendo: «Soy demasiado viejo. No puedo aprender esto. Lo único que puedo hacer es tumbarme y dejar que el tren me pase por encima». Sin embargo, la reacción de los jóvenes, los que están llenos de energía y los ambiciosos, es decir: «¡Dejadme subir al tren! Este tren representa mi futuro. Es mi destino. Dejad que me ponga en el asiento del conductor».

Esperemos que la gente de este siglo utilice la espada de la ciencia sabiamente y con compasión.

Pero, para entender mejor cómo podríamos vivir en una civilización planetaria, quizá resulte instructivo vivir durante un día en el año 2100, con el fin de ver cómo afectarán esas tecnologías a nuestra vida cotidiana, así como a nuestras carreras, nuestras esperanzas y nuestros sueños.

9

UN DÍA CUALQUIERA EN 2100

1 de enero de 2100, a las seis y cuarto de la mañana



> Desde Aristóteles hasta Tomás de Aquino, la perfección significa una sabiduría arraigada en la experiencia y en las relaciones mediante las cuales se aprende la vida moral a través del ejemplo. Nuestra perfección no se basa en la mejora genética, sino en la mejora del carácter.
>
> STEVEN POST

TRAS UNA NOCHE celebrando la llegada del Año Nuevo, está usted profundamente dormido.

De repente, la pantalla mural se enciende. En ella aparece un rostro amigable y familiar. Es Molly, el programa informático que usted se compró hace poco. Molly anuncia jubilosamente: «John, despierte. Le necesitan en la oficina. En persona. Es importante».

«Pero, bueno, ¿qué dice, Molly? Está de broma —refunfuña usted—. Es el día de Año Nuevo, y tengo resaca. ¿Qué cosa puede ser tan importante?»

Usted sale de la cama lentamente y se encamina de mala gana hacia el cuarto de baño. Mientras se lava la cara, cientos de sensores de ADN y proteínas, ocultos en el espejo, el inodoro y el lavabo se ponen en acción silenciosamente, analizando las moléculas que usted emite en su aliento y sus fluidos corporales, buscando el más leve indicio de cualquier enfermedad a nivel molecular.

Al salir del baño, se enrolla usted alrededor de la cabeza unos cables que le permiten controlar su hogar por telepatía: eleva usted mentalmente la temperatura del apartamento, pone un poco de música suave, le dice al cocinero robótico de la cocina que prepare el desayuno y haga café, y ordena a su coche magnético que salga del garaje y esté listo para recogerle. Cuando entra en la cocina, ve los brazos mecánicos del cocinero robótico preparando unos huevos, justo como a usted le gustan.

Entonces se pone usted las lentes de contacto y se conecta a internet. Parpadeando, ve las páginas de internet tal como se iluminan en la retina de su ojo. Mientras se toma un café caliente, va escaneando los titulares que aparecen en sus lentes de contacto.

- El puesto avanzado de Marte pide más suministros. Se acerca el invierno en ese planeta. Si han de llevar a cabo la etapa siguiente de la colonización, sus colonos necesitan recibir más recursos de la Tierra, con el fin de soportar un clima helador. El plan es comenzar la primera fase de adaptación de Marte a las condiciones de la Tierra, elevando la temperatura de su superficie.
- Las primeras naves interestelares están listas para el despegue. Millones de nanorrobots, cada uno del tamaño de una cabeza de alfiler, serán lanzados desde la base lunar, orbitarán alrededor de Júpiter utilizando el campo magnético de este planeta, y luego se dirigirán hacia una estrella cercana. Sin embargo, pasarán años antes de que unos cuantos nanorrobots lleguen a su destino en otro sistema estelar.
- Otro animal extinguido va a formar parte del zoo local. Esta vez se trata de un raro ejemplar de tigre de dientes de sable, resucitado a partir del ADN que se ha encontrado congelado en la tundra. Como la Tierra ha venido sufriendo un calentamiento global, se ha ido recuperando el ADN de un número cada vez mayor de animales extinguidos y luego se ha clonado este ADN para llenar los zoos de todo el mundo.
- El ascensor espacial, después de años transportando cargas al espacio, permite ahora que un número limitado de turistas se desplace al espacio exterior. El coste de la navegación espacial ha caído en picado durante los últimos años, reduciéndose a su quincuagésima parte desde que se inauguró el ascensor espacial.
- Las centrales de fusión más antiguas tienen ahora casi cincuenta años. Se acerca el momento de jubilar a algunas de ellas y construir otras nuevas.
- Grupos de científicos están realizando un minucioso seguimiento de un nuevo virus letal que ha brotado de manera repentina en la Amazonia. Por ahora, parece estar confinado en un área reducida, pero no se conoce tratamiento alguno para combatirlo. Varios equipos de científicos están secuenciando frenéticamente sus genes para averiguar cuáles son sus puntos débiles y cómo atacarlo.

De repente, un tema capta su atención:

- Se ha detectado inesperadamente una vía de agua en los diques que rodean Manhattan. Si estos diques no se reparan, toda la ciudad podría quedar sumergida, como muchas otras ciudades en el pasado.

«Oh, oh —se dice usted—. Es por eso por lo que me han llamado de la oficina y me han despertado.»

Así pues, deja usted el desayuno para otro momento, se viste y sale del apartamento como una exhalación. Su coche, que ha salido solo del garaje, le está esperando en el exterior. Le ordena usted telepáticamente que le lleve a la oficina lo más rápido posible. El coche magnético accede al instante a internet, al GPS y a los miles de millones de chips ocultos en la carretera que controlan constantemente el tráfico.

El coche magnético arranca en silencio, flotando sobre un cojín de magnetismo creado por el pavimento superconductor. El rostro de Molly aparece de repente en el parabrisas del coche. «John, el último mensaje de su oficina dice que se reúna usted con todos los demás en la sala de conferencias. También tiene un videomensaje de su hermana».

Como el coche se conduce solo, tiene usted tiempo de buscar el mensaje de vídeo que le ha dejado su hermana. La imagen de esta aparece en su reloj de pulsera y dice: «John, recuerda que este fin de semana tenemos la fiesta de cumpleaños de Kevin, que cumple seis años. Prometiste comprarle el último perro robótico. Y, dicho sea de paso, ¿estás saliendo con alguien? Mientras jugaba al bridge en internet, conocí a alguien que podría gustarte».

«Oh, oh», se dice usted para sus adentros.

Le gusta ir en su coche magnético. No hay que preocuparse por baches ni socavones, ya que el vehículo flota sobre la carretera. Lo mejor es que rara vez hay que ponerle combustible, ya que casi no hay fricción que lo frene. (Es difícil creer que hubiera una crisis energética a principios de siglo. Esta reflexión le hace mover la cabeza, cuando piensa que la mayor parte de aquella energía se gastaba en contrarrestar la fricción).

Recuerda la inauguración de la autopista superconductora. Los medios de comunicación lamentaron que la era de la electricidad, que se había convertido en algo tan familiar, tocara a su fin, porque se entraba en la nueva era del magnetismo. En realidad, no se echa de menos en absoluto la era de la electricidad. Al mirar hacia fuera y ver coches, camiones y trenes lustrosos e impecables que pasan como un rayo, se da usted cuenta de que el magnetismo es la mejor alternativa, y permite ahorrar dinero durante el proceso.

El coche magnético pasa ahora por el vertedero de la ciudad. Se ve que la mayor parte de la basura consiste en ordenadores y piezas de robots. Dado que los chips casi no cuestan dinero, menos aún que el agua, los que ya son obsoletos se amontonan en los vertederos de todo el mundo. Se habla de utilizar chips como relleno para nivelar terrenos.



LA OFICINA

Finalmente llega usted al edificio donde está su oficina. Es la sede central de una importante empresa constructora. Al entrar, no nota que un silencioso láser reconoce su iris e identifica su rostro. Ya no se necesitan tarjetas de seguridad de plástico. La identidad de cada persona es su propio cuerpo.

La sala de conferencias está casi vacía. Solo encuentra a unos pocos compañeros de trabajo sentados alrededor de la mesa. Pero, al momento, ve usted en sus lentes de contacto cómo empiezan a materializarse rápidamente las imágenes tridimensionales de los participantes en torno a la mesa. Los que no pueden acudir a la oficina están presentes holográficamente.

Entonces recorre usted la habitación con la mirada. Sus lentes de contacto identifican a todas las personas que están sentadas alrededor de la mesa, mostrando al mismo tiempo sus biografías y sus historiales. Observa que hay unos cuantos peces gordos. Anota mentalmente quiénes son las personas importantes que asisten a la reunión.

La imagen de su jefe se materializa de repente en la silla que le corresponde y anuncia: «Caballeros, como seguramente ya han oído, los diques que rodean Manhattan han empezado súbitamente a filtrar agua. Es grave, pero lo hemos detectado a tiempo, por lo que no hay peligro de que los diques se rompan. Sin embargo, por desgracia, los robots que hemos enviado a hacer las reparaciones han fracasado».

De repente, las luces pierden intensidad y se ve usted rodeado por la imagen tridimensional de la parte del dique que se encuentra bajo el agua. Está usted completamente sumergido y tiene ante sí la imagen del dique, que presenta una enorme grieta.

Cuando la imagen rota, puede ver con precisión por dónde se ha producido la filtración. Ve usted en el dique una grieta grande y extraña que le llama la atención. «No basta con enviar los robots —dice el jefe—. Es un tipo de filtración que no está contemplada en su programación. Necesitamos enviar allí gente experimentada que pueda valorar la situación e improvisar. No necesito recordarles que, si fracasamos, Nueva York puede sufrir el mismo destino que otras grandes ciudades, algunas de las cuales están ahora sumergidas».

Un estremecimiento sacude a todo el grupo. Todos conocen los nombres de las grandes ciudades que tuvieron que ser abandonadas cuando subió el nivel de los mares. Aunque las energías renovables y la de fusión desplazaron hace muchas décadas a los combustibles fósiles como fuente principal de energía, la población todavía está padeciendo los efectos del dióxido de carbono que fue emitido a la atmósfera durante la primera mitad del siglo pasado.

Tras mucho discutir, se decide enviar un grupo de robots controlados por humanos para hacer la reparación. Ahí es donde usted entra en escena. Usted colaboró en el diseño de esos robots. Se sitúa a unos trabajadores humanos cualificados dentro de unas cápsulas, con unos electrodos colocados alrededor de sus

cabezas. Mediante las señales que emiten sus cerebros, los trabajadores entran en contacto telepático con los robots. Desde sus cápsulas pueden ver y sentir todo lo que los robots ven y sienten. Es como estar allí en persona, pero con un nuevo cuerpo sobrehumano.

Usted está orgulloso de su trabajo, y con razón. Estos robots controlados telepáticamente han demostrado su valía en muchas ocasiones. La base lunar está controlada en gran medida por trabajadores humanos, que están seguros y confortablemente instalados dentro de sus cápsulas en la Tierra. Ahora bien, dado que una señal de radio tarda un segundo en llegar a la Luna, esto quiere decir que los trabajadores han de ser entrenados para ajustar ese retraso.

(A usted le hubiera gustado colocar sus robots también en la base marciana. Pero, como una señal tarda hasta veinte minutos en llegar a Marte, y otros veinte en volver de allí, se decidió que la comunicación con unos robots situados en Marte sería demasiado difícil. Lamentablemente, y a pesar de todo nuestro progreso, hay una cosa que no se puede ajustar: la velocidad de la luz).

Pero hay algo que no deja de preocuparle en el transcurso de la reunión.

Finalmente se arma usted de valor para interrumpir al jefe. «Quisiera no tener que decir esto, señor, pero, si se observa la filtración del dique, la grieta se parece sospechosamente a una marca que haya podido hacer unos de nuestros robots».

Un ruidoso murmullo se extiende de inmediato por toda la habitación. Se oye un coro de objeciones y el volumen de las voces es cada vez más alto: «¿Un robot de los nuestros? Imposible. Absurdo. Nunca ha sucedido una cosa así», protestan todos.

Entonces el jefe impone silencio y responde de una manera solemne: «Me temía que alguien iba a plantear esta cuestión. Permítanme decir que se trata de un asunto sumamente importante, y que ha de mantenerse dentro de una confidencialidad estricta. Esta información no debe salir de aquí, hasta que emitamos nuestro propio comunicado para la prensa. Sí, la filtración ha sido obra de uno de nuestros robots, que quedó fuera de control».

Se arma un jaleo tremendo en la reunión. Los presentes mueven la cabeza con incredulidad. ¿Cómo puede suceder algo así?

«Nuestros robots han tenido un historial perfecto —insiste el jefe—. Absolutamente intachable. Ni un solo robot ha causado jamás daño alguno. Sus mecanismos de seguridad han demostrado una y otra vez que son efectivos. Ese es su historial. Pero, como ya saben ustedes, nuestra última generación de robots de tecnología avanzada utiliza ordenadores cuánticos, que son los más potentes que existen, aproximándose incluso a la inteligencia humana. Sí, a la inteligencia humana. Pero, en la teoría cuántica hay siempre una pequeña, pero clara, probabilidad de que pueda producirse un error. En este caso, se han vuelto locos.»

Ahora es cuando usted se deja caer pesadamente sobre la silla, abrumado por estas noticias.

DE NUEVO EN CASA

Ha sido un día muy largo: primero, organizando el grupo robótico de reparaciones para que tapen la filtración, y luego ayudando a desactivar todos los robots experimentales que usan ordenadores cuánticos, para que estén inactivos al menos hasta que este asunto esté completamente resuelto. Por fin está de vuelta en casa. Se encuentra exhausto. Justo cuando acaba de hundirse cómodamente en el sofá, Molly aparece en la pantalla mural. «John, tiene usted un mensaje importante del doctor Brown».

¿El doctor Brown? ¿Qué será lo que tiene que decirle su médico robótico?

«Pónmelo en la pantalla», le dice usted a Molly. Su médico aparece en la pantalla mural. El «doctor Brown» tiene tanto realismo que usted a veces se olvida de que solo es un programa informático.

«Siento molestarle, John, pero tengo que comunicarle algo. ¿Recuerda el accidente que tuvo esquiando el año pasado, cuando casi se mata?»

¿Cómo iba usted a olvidarlo? Todavía se sobrecoge al recordar cómo se estrelló contra un árbol mientras esquiaba en lo que queda de los Alpes. Como la mayor parte de la nieve alpina se ha fundido ya, tuvo usted que elegir una estación de esquí con la que no estaba familiarizado y que se encuentra a una gran altitud. Al no estar habituado al terreno, tropezó accidentalmente al bajar la ladera y se empotró contra un grupo de árboles a sesenta y cinco kilómetros por hora.

El doctor Brown continúa: «El historial indica que quedó usted inconsciente como consecuencia de los golpes recibidos, sufriendo una conmoción y múltiples lesiones internas, pero la ropa que vestía le salvó la vida».

Aunque usted estaba inconsciente, su ropa inmediatamente llamó a una ambulancia, descargó su historial médico y localizó las coordenadas exactas del lugar donde se encontraba. Más tarde, en el hospital, unos robots le practicaron microcirugía para detener la hemorragia, le suturaron los pequeños vasos sanguíneos que se habían roto y le curaron otras lesiones.

«Su estómago, su hígado y sus intestinos estaban dañados sin remedio —le recuerda el doctor Brown—. Afortunadamente, pudimos generar un nuevo conjunto de órganos justo a tiempo.»

De repente se siente usted mismo casi como un robot, al pensar que una gran parte de su cuerpo está formada por órganos generados en una fábrica de tejidos orgánicos.

«Como usted ya sabe, John, el historial también dice que se le podía haber sustituido el brazo, con fractura múltiple, por otro totalmente mecánico. El brazo robótico más moderno que tenemos habría multiplicado por cinco la fuerza del suyo. Pero usted rehusó el implante.»

«Sí —responde usted—, creo que soy un tipo bastante anticuado. Lo aceptaría si pusieran carne sobre el acero.»

«John, tenemos que hacer una revisión periódica de sus nuevos órganos. Tome su escáner de IRM y páselo lentamente sobre la zona de su estómago.»

Se va usted al cuarto de baño y coge un pequeño aparato, más o menos del tamaño de un teléfono móvil, y lo pasa muy despacio sobre sus órganos. De inmediato ve cómo se ilumina en la pantalla mural la imagen tridimensional de sus órganos internos.

«John, vamos a analizar estas imágenes para ver cómo se está reponiendo su cuerpo. A propósito, esta mañana los sensores de ADN de su cuarto de baño han detectado el desarrollo de un cáncer en su páncreas.»

«¿Un cáncer?». De repente se pone usted erguido. Está perplejo. «Pero yo creía que me había curado del cáncer hace años. Ni siquiera habla ya nadie sobre eso. ¿Cómo puede ser que tenga cáncer de nuevo?».

«En realidad, la ciencia nunca cura el cáncer. Digamos que estamos en tregua con el cáncer, en un alto el fuego. Hay demasiadas clases de cáncer. Igual que en el caso del resfriado común. Tampoco lo curamos. Nos limitamos simplemente a mantenerlo a raya. He ordenado a algunas nanopartículas que atrapen esas células cancerosas. Solo hay unos pocos cientos. Es mera rutina. Pero, si no se realizara esta intervención, probablemente moriría usted en unos siete años», precisa el doctor con un rostro del todo inexpresivo.

«¡Qué alivio!», se dice usted a sí mismo.

«Sí, hoy en día podemos diagnosticar el cáncer años antes de que se forme un tumor», dice el doctor Brown.

«¿Un tumor? ¿Qué es eso?»

«Bueno, es una palabra que está en desuso y designa un tipo de cáncer avanzado. Casi ha desaparecido de nuestro lenguaje. Ya nunca se ven esas cosas», añade el doctor Brown.

Entonces se da usted cuenta de que, con todas estas emociones, se ha olvidado de que su hermana amenazaba con ponerle en contacto con alguien. Llama usted a Molly de nuevo.

«Molly, no tengo ningún plan para este fin de semana. ¿Puede usted encontrarme a alguien? Ya sabe qué tipo de persona me gusta.»

«Sí, sus preferencias están programadas en mi memoria. Espere un momento mientras hago una búsqueda en internet». Pasado un minuto, Molly muestra los perfiles de las candidatas prometedoras que también esperan ante sus pantallas murales, planteando la misma pregunta.

Tras examinar a las candidatas, selecciona usted finalmente una que le resulta atractiva. Esta persona se llama Karen, y a usted le parece que tiene algo especial. «Molly, envíe a Karen un mensaje y, de una manera muy cortés, pregúntele si está disponible este fin de semana. Hay un nuevo restaurante que acaba de abrir y me gustaría probarlo».

Entonces Molly envía a Karen el perfil de usted en un videocorreo.

Esa noche usted se relaja invitando a algunos de sus colegas a casa para tomar una cerveza y ver fútbol. Sus amigos podían ver el partido apareciendo en la sala de estar mediante imágenes holográficas, pero, en cierto modo, es más divertido animar al equipo local, si sus amigos comparten esa emoción en persona. Se sonríe, imaginando que probablemente era así hace miles de años, cuando los cavernícolas tenían que reunirse unos con otros de una manera física.

De repente, toda la sala se ilumina, y parece como si estuviera usted en el campo de fútbol en la línea de 50 yardas. Cuando el *quarterback* hace un pase hacia delante, usted está justo a su lado. El partido se está jugando alrededor de usted.

Durante el descanso, usted y sus amigos se ponen a calibrar a los jugadores. Bebiendo cerveza y comiendo palomitas de maíz, tienen un encendido debate sobre quién entrena más, quién es más duro jugando, quién tiene el mejor entrenador y quién el mejor terapeuta génico. Todos están de acuerdo en que su equipo local tiene el mejor genetista de la liga, así como los mejores genes que puedan comprarse con dinero.

Cuando sus amigos ya se han ido, está usted todavía demasiado emocionado para irse a dormir. Por lo tanto, decide jugar una partida rápida de póquer antes de acostarse.

«Molly —le pide a su secretaria virtual—, ya sé que es tarde, pero quiero jugar una partida de póquer. Creo que estoy de suerte. Alguien tiene que haber en Inglaterra, China, la India o Rusia que esté despierto y quiera jugar unas manos ahora mismo.»

«No hay problema», dice Molly. Varios rostros prometedores aparecen en la pantalla. Cuando las imágenes tridimensionales de los jugadores se materializan en su sala de estar, empieza a acariciar la idea de ver cuál de ellos puede ser más hábil a la hora de marcarse un farol. Es gracioso, piensa usted, que se sienta uno más cercano a gente de países distantes que a los vecinos de la casa de al lado. Las fronteras de los estados no significan gran cosa hoy en día.

Justo antes de que por fin se vaya usted a la cama, Molly le interrumpe de nuevo, apareciendo en el espejo del cuarto de baño.

«John, Karen acepta su invitación. Todo está organizado para este fin de semana. Haré una reserva en ese restaurante nuevo. ¿Quiere ver el perfil que Karen ha escrito sobre sí misma? ¿Quiere que haga una búsqueda en internet para verificar la exactitud de su perfil? Se sabe que hay gente que… en fin… miente al hacer su perfil.»

«No —responde usted—, dejemos que sea una sorpresa para el fin de semana». Después de la partida de póquer, de nuevo se siente usted afortunado.

EL FIN DE SEMANA

Ya estamos en el fin de semana, y es hora de ir de tiendas para comprar el regalo de Kevin. «Molly, ponme la avenida en la pantalla».

De repente aparece la avenida en la pantalla mural. Solo con mover los brazos y los dedos, la imagen de la pantalla mural traza una senda a lo largo de la avenida. Da usted un paseo virtual hasta llegar a la imagen de la tienda de juguetes. Sí, tienen exactamente los animales de compañía robóticos de juguete que usted desea. Entonces ordena telepáticamente al coche que le lleve a la avenida. (Podía haber encargado el juguete en línea. O podía haber recibido el proyecto original a través del correo electrónico, y luego encargar a su fabricante que le materializara el juguete en casa a partir de los planos, utilizando materia programable. Pero siempre está bien salir del apartamento e ir de compras de vez en cuando).

Mientras circula en su coche magnético, mira al exterior y ve gente que está de paseo. Hace un día muy bueno. También ve usted robots de todas clases. Hay robots que pasean al perro, también hay robots oficinistas, cocineros, recepcionistas y animales de compañía. Parece como si cualquier tarea que sea peligrosa, repetitiva o que solo requiere la más mínima interacción humana, fuera reproducida por robots. De hecho, los robots son ahora un buen negocio. Ve usted a su alrededor, por todas partes, anuncios de alguien que puede reparar, mantener, mejorar o construir robots. Cualquiera que trabaje en el campo de la robótica tiene un brillante futuro. El negocio de los robots es mayor que la industria del automóvil del siglo pasado. Y usted es consciente de que, en su mayoría, los robots están ocultos, reparando silenciosamente las infraestructuras de la ciudad y manteniendo los servicios esenciales.

Al llegar a la tienda de juguetes, un empleado robótico le saluda a la entrada. «¿Puedo ayudarle en algo?», pregunta.

«Sí, desearía comprar un perro robótico.»

Se pone usted a examinar los últimos modelos de perros robóticos. Es increíble lo que estos robots pueden hacer, se dice usted a sí mismo. Pueden jugar, correr, buscar cosas y traerlas, en definitiva, todo lo que un perro puede hacer. Todo menos hacer pis en la alfombra. Se le ocurre pensar que quizá sea esa la razón por la que los padres los compran para sus niños.

Entonces le dice usted al empleado robótico: «Quisiera comprar un perro robótico para mi sobrino de seis años. Se trata de un niño muy inteligente, el tipo de niño que es participativo. Pero, a veces, también es tímido y silencioso. ¿Qué tipo de perro le ayudaría a salir de su caparazón?».

El robot contesta: «Lo siento, señor. Eso está fuera de mi programación. ¿Le interesaría tal vez un juguete espacial?».

Olvida usted que los robots, por muy versátiles que sean, han de recorrer todavía un largo camino para llegar a comprender el comportamiento humano.

A continuación, va usted a unos grandes almacenes donde venden ropa de hombre. Es hora de cambiar esas ropas anticuadas, si desea usted impresionar positivamente a su amiga. Se prueba algunos trajes de diseño. Todos parecen

elegantes, pero no son de su talla. Se siente decepcionado. Pero luego saca su tarjeta de crédito, que contiene sus medidas tridimensionales precisas. Se introducen sus datos en el ordenador y, luego, en una fábrica le cortan un nuevo traje, que pronto le entregarán a domicilio, que siempre le sienta a la perfección.

Finalmente, va usted al supermercado. Explora todos los chips que están escondidos en cada plástico, y luego en sus lentes de contacto compara los precios para ver qué comercio de la ciudad tiene los productos de mejor calidad y precio. No más conjeturas sobre quién tiene los precios más bajos.

LA AMIGA

Lleva usted toda la semana esperando esta cita. Mientras se preparaba para encontrarse con Karen, le sorprendió sentirse de nuevo como un escolar. Decidió que, si iba a invitarla a ir a su apartamento después de cenar, tenía que hacer algunas remodelaciones de su gastado mobiliario. Afortunadamente, la mayor parte del mobiliario de la cocina y la sala está hecho de materia programable.

«Molly —dice usted—, ¿puede mostrarme el catálogo de las nuevas encimeras de cocina y los muebles más modernos que ofrece el fabricante? Deseo reprogramar el mobiliario. Tiene un aspecto realmente viejo.»

Los últimos diseños de mobiliario no tardan en aparecer en la pantalla.

«Molly, por favor, descargue los proyectos de esta encimera de cocina, ese sofá y esta mesa, y luego haga el favor de instalarlos.»

Mientras usted se prepara para la cita, Molly descarga e instala los proyectos. Al instante, la encimera de la cocina, así como el sofá y la mesa de la sala de estar, empiezan a disolverse, convirtiéndose en algo que parece masilla, para luego volver a formarse gradualmente con los nuevos diseños. En una hora el apartamento queda como nuevo. (Recientemente estuvo usted examinando las páginas de ventas de inmuebles en internet, y observó que las casas hechas de materia reprogramable se estaban poniendo muy de moda. De hecho, en su empresa de ingeniería hay unos planes muy ambiciosos de crear toda una ciudad en medio del desierto, construida íntegramente con materia reprogramable. Basta con pulsar un botón y, ¡zas!, una ciudad al instante.

A usted le parece que su apartamento tiene un aspecto algo descolorido. Mueve la mano, y el dibujo y el color del papel de las paredes cambian de inmediato. Ciertamente, se dice usted, tener un empapelado inteligente evita tener que repintar las paredes.

Por el camino coge algunas flores y, finalmente, se encuentra con su amiga. Está agradablemente sorprendido. Congenia de maravilla. Algo está pasando.

Durante la cena averigua que Karen es artista. La joven bromea diciendo que, en circunstancias normales, estaría sin un céntimo, muriéndose de hambre y vendiendo

sus pinturas en la calle por una miseria. En cambio, tiene un gran éxito como diseñadora de la web. De hecho, tiene su propia empresa. Al parecer, todo el mundo desea los diseños más actuales para la web. Hay una enorme demanda de arte creativo.

Traza varios círculos en el aire con los dedos, y aparecen algunas de sus animaciones. «He aquí algunas de mis últimas creaciones», afirma orgullosa.

Entonces usted comenta: «Ya sabes, como ingeniero trabajo con robots todo el día. Algunos son muy avanzados, pero también pueden a veces portarse como estúpidos. ¿Qué sucede con esto en tu campo? ¿Andan los robots también por ahí haciendo incursiones?».

«Ni hablar», protesta Karen. Afirma que ella trabaja exclusivamente con personas creativas, para las cuales la mercancía de más valor es la imaginación, algo de lo que carecen incluso los robots más avanzados.

«Puede que yo sea muy antigua, pero en mi campo usamos robots solo para hacer copias o trabajos de oficina —dice orgullosa—. Me gustaría ver el día en que los robots puedan hacer algo realmente original, como contar un chiste, escribir una novela o componer una sinfonía.»

Eso aún no ha sucedido, pero podría suceder, piensa usted.

Mientras Karen habla, a usted se le pasa una pregunta por la mente. ¿Cuántos años tendrá? Dado que la medicina consiguió hace ya años frenar el proceso de envejecimiento, la gente puede tener cualquier edad. En su página web, Karen no decía cuál era su edad. Pero no aparenta más de veinticinco años.

Después de acompañarla a su casa, empieza usted a soñar despierto. ¿Cómo sería vivir con una persona como ella, pasar el resto de la vida a su lado? Pero hay algo que le preocupa. Algo que le está fastidiando durante todo el día.

Se pone frente a la pantalla mural y dice: «Molly, por favor, llame al doctor Brown». De repente siente gratitud por el hecho de que los médicos robóticos visiten a domicilio a cualquier hora del día, sin quejarse nunca, ni alegar encontrarse mal. Esas cosas no forman parte de su programación.

La imagen del doctor Brown aparece al instante en la pantalla mural. «¿Hay algo que te preocupe, hijo?», pregunta en un tono paternal.

«Doctor, tengo que hacerle una pregunta que me tiene preocupado últimamente.»

«Dime qué es», le dice el doctor Brown.

«Doctor —dice usted—, ¿cuántos años más cree que viviré?»

«¿Quiere decir que cuál es su esperanza de vida? Bueno, en realidad no lo sabemos. Su historial dice que tiene usted setenta y dos años, pero biológicamente sus órganos son más bien de treinta años. Usted formó parte de la primera generación que fue elegida para ser reprogramada genéticamente y vivir más años. Optó por detener su envejecimiento más o menos a los treinta años de edad. No hay suficientes personas de su generación que hayan muerto ya, por lo que no disponemos de datos

para hacer pronósticos. Así pues, no tenemos modo alguno de saber cuánto vivirá usted.»

«Entonces, ¿cree que podré vivir eternamente?», le pregunta usted al doctor.

«¿Y ser inmortal? —El doctor Brown frunce el ceño—. No, no lo creo. Hay una gran diferencia entre alguien que vive eternamente y alguien que tiene un lapso de vida tan largo que aún no se ha podido medir.»

«Pero, si no envejezco —protesta usted—, cómo se supone que puedo saber cuándo he de… —Se detiene usted a media frase—. Ah, bueno… mire, acabo de conocer a alguien especial y, suponiendo que desee hacer planes para vivir con ella, ¿cómo puedo ajustar las etapas de mi vida a las suyas? Si mi generación no ha vivido aún suficiente para morir —continúa diciendo—, entonces, ¿cómo puedo saber cuándo casarme, tener hijos y hacer planes para la jubilación? ¿Cómo he de fijar las etapas de mi vida?»

«No conozco la respuesta a esas preguntas. Mire, la raza humana es ahora una especie de cobaya —dice el doctor Brown—. Lo siento, John. Está navegando por un mar inexplorado.»

DENTRO DE UNOS POCOS MESES

Los próximos meses son una sorpresa maravillosa para usted y Karen. Usted la lleva al salón de la realidad virtual y se divierte mucho viviendo vidas imaginarias y absurdas. Es como ser un niño de nuevo. Usted y Karen entran en una habitación vacía. El programa informático de un mundo virtual se proyecta en sus lentes de contacto, y el escenario cambia inmediatamente. En un programa, ustedes están huyendo de unos dinosaurios, pero, dondequiera que vayan, otro dinosaurio surge de los arbustos. En otro programa, libran una batalla con alienígenas del espacio o piratas que intentan abordar su nave. En otro programa deciden cambiar de especie y se convierten en dos águilas que planean por el aire. Y en otro programa están tomando el sol en una romántica isla de los Mares del Sur, o bailando a la luz de la luna con una suave música que flota en el aire.

Después de un tiempo, usted y Karen desean intentar algo nuevo. En vez de vivir vidas imaginarias, deciden vivir vidas reales. Así, cuando coinciden sus vacaciones, deciden realizar un recorrido maratoniano por Europa.

Usted le dice a la pantalla mural: «Molly, Karen y yo queremos planificar unas vacaciones en Europa. Unas vacaciones reales. Por favor, compruebe vuelos, hoteles y cualquier otra cosa que haga falta. Luego hágame una lista de los espectáculos y acontecimientos que puedan interesarnos. Ya conoce usted nuestros gustos». En pocos minutos, Molly tiene ya hecho un itinerario detallado.

Luego, cuando caminen por las ruinas del Foro, podrán ver el Imperio romano resucitado en sus lentes de contacto. Al pasar por los restos esparcidos de columnas,

piedras y escombros, pueden ver lo que fue en otro tiempo la Roma imperial en la cima de su gloria.

También ir de compras es una delicia, aunque en las tiendas locales haya que regatear en italiano. Pueden ver ustedes claramente las traducciones que aparecen detrás de la persona con la que están hablando. Y nada de llevar una guía o un plano arrugado en el bolsillo. Todo está en sus lentes de contacto.

Por la noche, contemplando el cielo nocturno sobre Roma, pueden ver con claridad las estrellas organizadas en constelaciones en sus lentes de contacto. Mirando a través del cielo, ven unas imágenes ampliadas de los anillos de Saturno, cometas que pasan, bellas nubes de gas y estrellas que explotan.

Un día Karen le revela por fin un secreto: su verdadera edad. Tiene sesenta y un años. En cierto modo, esto tampoco parece ya muy importante.

«Karen, ¿te sientes más feliz por el hecho de vivir tanto tiempo?»

«¡Sí! —contesta de inmediato—. ¿Sabes?, mi abuela vivió en una época en que las mujeres se casaban, tenían una familia y tal vez conseguían hacer una carrera. A mí me gusta pensar que me he reencarnado tres veces, con tres carreras, y nunca he mirado hacia atrás. Primero, fui guía turística en varios países, viajando por el mundo. Fue una vida maravillosa. El turismo es una industria enorme, con muchísimos empleos. Pero, más tarde, quise hacer algo más relevante. En consecuencia, me hice abogada, y defendía causas y personas que me importaban. Luego decidí dar rienda suelta a mi vertiente artística y puse en marcha mi empresa de diseño en la web. ¿Y sabes una cosa? Estoy orgullosa de poder decir que nunca he usado un robot. Ningún robot puede ser un guía turístico personal, ni llevar un caso en los tribunales, ni producir bellas obras de arte.»

El tiempo lo dirá, piensa usted en silencio.

«¿Y estás planeando hacer una cuarta carrera?», pregunta usted.

«Bueno, puede que surja algo mejor». Y le dedica a usted una sonrisa.

«Karen —dice finalmente—, si dejamos de envejecer, ¿cómo sabremos cuál es el mejor momento para, en fin, ya sabes, casarse, tener niños y crear una familia? El reloj biológico ha saltado por la ventana hace décadas. Por eso estaba pensando que quizá sea ya el momento de asentarnos y tener una familia.»

«¿Estás hablando de tener hijos? —dice Karen un poco sorprendida—. Eso es algo en lo que nunca he pensado seriamente. Bueno, hasta ahora. Todo depende de que aparezca el hombre adecuado», dice dedicándole una sonrisa pícara.

Más tarde, usted y Karen hablan del matrimonio, y del nombre que elegirían para una criatura, y también de los genes que desearían que tuviera.

Se acerca usted a la pantalla mural y dice: «Molly, ¿puede darme la lista de los últimos genes que han sido aprobados por el gobierno?». Cuando mira la lista, ve los diversos genes que hay para el color del pelo, de los ojos, la altura, la complexión, y ahora se ofrecen incluso algunos rasgos de la personalidad. Parece ser que esa lista crece cada año. También ve usted la larga lista de enfermedades hereditarias que

pueden prevenirse o curarse. Dado que en su familia ha habido cirrosis quística durante siglos, es un alivio no tener que preocuparse más por eso.

Al examinar la lista de los genes aprobados, se siente usted no solo como un futuro padre, sino como una especie de dios, creando un niño por encargo a imagen y semejanza suya.

Entonces Molly dice: «Hay un programa que puede analizar el ADN de un bebé y dar luego una aproximación razonablemente buena de cómo serán su rostro, la estructura de su cuerpo y su personalidad. ¿Desea descargar ese programa y ver qué aspecto tendría su hijo en el futuro?».

«No —responde usted—. Algunas cosas es mejor dejarlas como un misterio.»

UN AÑO MÁS TARDE

Karen está ahora embarazada, pero sus médicos le aseguran que no corre peligro alguno por subir al ascensor espacial, que ahora está abierto para los turistas.

«Mira —le dice usted a Karen—, cuando era niño, siempre quise ir al espacio exterior. Ya sabes, ser astronauta y todo eso. Pero un día pensé en lo que tenía que ser ir sentado sobre millones de litros de combustible volátil que podía explotar con una simple chispa. Entonces, mi entusiasmo por los viajes espaciales empezó a enfriarse un poco. Pero el ascensor espacial es diferente. Limpio, seguro, sin problemas. Así es como hay que viajar.»

Cuando usted y Karen entran en el ascensor, ven que el operador pulsa lo que parece un botón de subida. Les parece a ustedes casi como si fueran a llegar al departamento de lencería. Pero no, lo que sienten es que van planeando hacia el espacio exterior. Sienten la lenta aceleración a medida que ascienden con rapidez por el aire. El indicador del ascensor marca «15 kilómetros, 30 kilómetros, 50 kilómetros…».

Ven cómo cambia el panorama en el exterior, de un segundo a otro. En un momento están ustedes mirando unas nubes aborregadas que pasan mientras planean adentrándose en la atmósfera. Luego el cielo cambia de rojo a morado y a negro profundo, y por fin ven las estrellas en todo su esplendor rodeándoles a ustedes. Empiezan a ver las constelaciones como nunca antes las han visto, resplandeciendo en la distancia. Las estrellas no parpadean, como parecían hacer desde la Tierra, sino que miran fijamente, como lo han hecho durante miles de millones de años.

El ascensor se detiene lentamente a unos 160 kilómetros de la superficie terrestre. Desde el espacio, ven ustedes un panorama deslumbrante que antes solo habían visto en fotografías.

Al mirar hacia abajo, ven de repente la Tierra con una luz completamente distinta. Se perciben los océanos, los continentes y las luces de las megaciudades que relucen en el espacio exterior.

Desde el espacio, la Tierra aparece tan serena que cuesta creer que la gente, en otro tiempo, derramara su sangre luchando en guerras desencadenadas por tontas disputas sobre fronteras. Estas naciones existen todavía, pero parecen tan solo algo extraño y pintoresco, menos importante en la actualidad, en una era en que la comunicación es instantánea y omnipresente.

Cuando Karen apoya la cabeza sobre su hombro, empieza usted a darse cuenta de que es testigo del nacimiento de una nueva civilización planetaria. Y su hijo será uno de los primeros ciudadanos llegados a esa nueva civilización.

Entonces saca de su bolsillo trasero un viejo y desgastado libro, y le lee a ella las palabras de alguien que murió hace más de cien años. Sus palabras le recuerdan los desafíos a los que se enfrentó la humanidad antes de alcanzar una civilización planetaria.

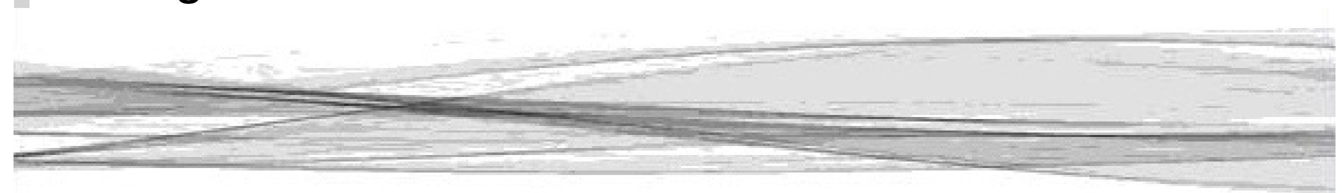
Mahatma Gandhi escribió:

Las raíces de la violencia:

la riqueza sin trabajar,
el placer sin conciencia,
el conocimiento sin carácter,
el comercio sin moralidad,
la ciencia sin humanidad,
el culto sin sacrificio,
la política sin principios.[1]



Bibliografía



Archer, David, *The Long Thaw: How Humans Are Changing the Next 100,000 Years of Earth's Climate*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2009.

Bezold, Clement, ed., *2020 Visions: Health Care Information Standards and Technologies*, United States Pharmacopeial Convention, Rockville, MD, 1993.

Brockman, Max, ed., *What's Next? Dispatches on the Future of Science*, Vintage, Nueva York, 2009 (hay trad. cast.: *La ciencia del futuro: ¿qué hay de nuevo en la ciencia?*, RBA, Barcelona, 2010).

Broderick, Damien, *The Spike: How Our Lives Are Being Transformed by Rapidly Advancing Technologies*, Forge, Nueva York, 2001.

Broderick, Damien, ed., *Year Million: Science at the Far Edge of Knowledge*, Atlas, Nueva York, 2008.

Brooks, Rodney A., *Flesh and Machines: How Robots Will Change Us.*, Vintage, Nueva York, 2003 (hay trad. cast.: *Cuerpos y máquinas: de los robots humanos a los hombres robot*, Ediciones B, Barcelona, 2003).

Brown, Lester, *Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization*, Norton, Nueva York, 2009 (hay trad. cast.: *Salvar el planeta. Plan B: ecología para un mundo en peligro*, Paidós Ibérica, Barcelona, 2004).

Canton, James, *The Extreme Future: The Top Trends That Will Reshape the World for the Next 5, 10, and 20 Years*, Dutton, Nueva York, 2006.

Coates, Joseph F., John B. Mahaffie y Andy Hines, *2025: Scenarios of U.S. and Global Society Reshaped by Science and Technology*, Oakhill Press, Greensboro, NC, 1997.

Cornish, Edward, ed., *Futuring: The Exploration of the Future*, World Future Society, Bethesda, MD, 2004.

Crevier, Daniel, *AI: The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*, Basic Books, Nueva York, 1993 (hay trad. cast.: *Inteligencia artificial,* Acento Editorial, Boadilla del Monte, 1996).

Davies, Paul, *The Eerie Silence: Renewing Our Search for Alien Intelligence*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston, 2010.

Denning, Peter J., ed., *The Invisible Future: The Seamless Integration of Technology into Everyday Life*, McGraw Hill, Nueva York, 2002.

Denning, Peter J., y Robert M. Metcalfe, *Beyond Calculation: The Next Fifty Years of Computing*, Copernicus, Nueva York, 1997.

Dertouzos, Michael, *What Will Be: How the New World of Information Will Change Our Lives*, HarperCollins, Nueva York, 1997 (hay trad. cast.: *¿Qué será?*, Planeta, Barcelona, 1997).

Didsbury, Howard F., Jr., ed., *Frontiers of the 21st Century: Prelude to the New Millennium*, World Future Society, Bethesda, MD, 1999.

—,*21st Century Opportunities and Challenges: An Age of Destruction or an Age of Transformation*, World Future Society, Bethesda, MD, 2003.

Dyson, Freeman J., *The Sun, the Genome, and the Internet: Tools of Scientific Revolutions*, Oxford University Press, Nueva York, 1999 (hay trad. cast.: *El sol, el genoma e internet: las tres cosas que revolucionarán el siglo XXI*. Debate, Barcelona, 2000).

Foundation for the Future, *Future of Planet Earth: Seminar Proceedings*, Foundation for the Future, Bellevue, WA, 2009; www.futurefoundation.org/publications/-index.htm.

—, *The Next Thousand Years*, Foundation for the Future, Bellevue, WA, 2004.

Friedman, George, *The Next 100 Years: A Forecast for the 21st Century*, Doubleday, Nueva York, 2009.

Hanson, William, *The Edge of Medicine: The Technology That Will Change Our Lives*, Palgrave Macmillan, Nueva York, 2008.

Kaku, Michio, *Visions: How Science Will Revolutionize the 21st Century*, Anchor, Nueva York, 1998 (hay trad. cast.: *Visiones: cómo la ciencia revolucionará la materia, la vida y la mente en el siglo XXI*, Debate, Barcelona, 1998).

Kurzweil, Ray, *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*, Viking, Nueva York, 2005.

McElheny, Victor K., *Drawing the Map of Life: Inside the Human Genome Project*, Basic Books, Nueva York, 2010.

McRae, Hamish, *The World in 2020: Power, Culture, and Prosperity*, Harvard Business School, Cambridge, MA, 1995.

Mulhall, Douglas, *Our Molecular Future: How Nanotechnology, Robotics, Genetics, and Artificial Intelligence Will Transform Our World*, Prometheus, Amherst, NY, 2002.

Petersen, John L., *The Road to 2015: Profiles of the Future*, Waite Group, Corte Madera, CA, 1994.

Pickover, Clifford A., ed., *Visions of the Future: Art, Technology and Computing in the Twentyfirst Century*, St. Martin's Press, Nueva York, 1994.

Rhodes, Richard, ed., *Visions of Technology: A Century of Vital Debate About Machines, Systems, and the Human World*, Simon & Schuster, Nueva York, 1999.

Ridley, Matt, *The Rational Optimist: How Prosperity Evolves*, HarperCollins, Nueva York, 2010 (hay trad. cast.: *El optimista racional*, Taurus, Madrid, 2011).

Rose, Steven, *The Future of the Brain: The Promise and Perils of Tomorrow's Neuroscience*, Oxford University Press, Nueva York, 2005 (hay trad. cast.: *Tu cerebro mañana: cómo será la mente del futuro*, Paidós Ibérica, Barcelona, 2008).

Seife, Charles, *Sun in a Bottle: The Strange History of Fusion and the Science of Wishful Thinking*, Viking Penguin, Nueva York, 2008.

Sheffield, Charles, Marcelo Alonso y Morton A. Kaplan, eds., *The World of 2044: Technological Development and the Future of Society*, Paragon House, St. Paul, MN, 1994.

Stock, Gregory, *Redesigning Humans: Choosing Our Genes, Changing Our Future*, Houghton Mifflin, Boston, 2003.

Thurow, Lester C., *The Future of Capitalism: How Today's Economic Forces Shape Tomorrow's World*, William Morrow, Nueva York, 1996 (hay trad. cast.: *El futuro del capitalismo*, Ariel, Barcelona, 1996).

Toffler, Alvin, y Heidi Toffler, *Revolutionary Wealth*, Knopf, Nueva York, 2006 (hay trad. cast.: *La revolución de la riqueza*, Debate, Barcelona, 2006).

van der Duin, Patrick, *Knowing Tomorrow? How Science Deals with the Future*, Eburon, Delft, Países Bajos, 2007.

Vinge, Vernor, *Rainbows End*, Tor, Nueva York, 2006 (hay trad. cast.: *El final del arco iris*, Ediciones B, Barcelona, 2008).

Watson, Richard, *Future Files: The 5 Trends That Will Shape the Next 50 Years*, Nicholas Brealey, Londres, 2008.

Weiner, Jonathan, *Long for This World: The Strange Science of Immortality*, HarperCollins, Nueva York, 2010.



MICHIO KAKU, nacido en 1947 en Estados Unidos de padres japoneses, es un eminente físico teórico, uno de los creadores de la teoría de campos de cuerdas. Apadrinado por Edward Teller, que le ofreció la beca de ingeniería Hertz, se formó en Harvard y en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley de la Universidad de California, donde obtuvo el doctorado en Física en 1972. Desde hace casi treinta años ocupa la cátedra Henry Semat de Física Teórica en la Universidad de Nueva York y es uno de los divulgadores científicos más conocidos del mundo; presenta dos programas de radio y participa en espacios de televisión y documentales. Es autor además de decenas de artículos y de varios libros, algunos de ellos traducidos al castellano: *Visiones* (1998), *Hiperespacio* (2001), *El universo de Einstein* (2005) y *Universos paralelos* (2008).

www.mkaku.org

Notas


Introducción: Una predicción para los próximos cien años

[1] Rhodes, pp. 29-30. <<

[2] www.learner.org/workshops/primarysources/corporations/docs/. <<

[3] Citado en Canton, p. 247. <<

[4] Citado en Canton, p. 247. <<

[5] Citado en Canton, p. 247. <<

[6] Cornish, p. 149. Véase también: «The Facts that Got Away», *New York Times*, 14 de noviembre de 2001. <<

1. El futuro de los ordenadores: La mente controlará la materia

[1] *Popular Mechanics*, citado en Kurzweil, p. 56. Véase también Andrew Hamilton, «Brains That Click», *Popular Mechanics*, marzo de 1940, p. 258. <<

[2] Rhodes, p. 206. <<

[3] Babak A. Parvie, «Augmented Reality in a Contact Lens», *IEEE Spectrum*, septiembre de 2009, www.spectrum.ieee.org/biomedical/bionics/augmentedrealityinacontactlens/0. <<

[4] Gary Stix, «Jacking into the Brain - Is the Brain the Ultimate Computer Interface?», *Scientific American*, noviembre de 2008, pp. 5661. <<

[5] Jeff Wise, «Thought Police: How Brain Scans Could Invade Your Private Life», *Popular Mechanics*, 15 de octubre de 2007, www.popularmechanics.com/science/health/neuroscience/4226614. <<

[6] *New Scientist*, 15 de octubre de 2008, n.º 2.678. <<

[7] David Baltimore, «How Biology Became Information Science», en Denning, pp. 53-54. <<

[8] *Ibid.*, p. 54. <<

[9] Bernhard Blümich, «The Incredible Shrinking Scanner: MRIlike Machine Becomes Portable», *Scientific American*, noviembre de 2008, p. 68. <<

2. El futuro de la IA: El auge de las máquinas

[1] John Markoff, *New York Times*, 25 de julio de 2009, p. A1, www.nytimes.com/2009/07/26/science/26robot.html?scp=1&sq=Scientists Worry Machines May Outsmart Man&st=cse. <<

[2] *Ibidem*. <<

[3] Kaku, p. 75. <<

[4] Crevier, p. 109. <<

[5] Paul W. Abrahams, «A World Without Work», en Denning y Metcalfe, p. 136. <<

[6] Richard Strozzi Heckler, «Somatics in Cyberspace», en Denning, p. 281. <<

[7] Sheffield *et al*., p. 30. <<

[8] Kurzweil, p. 267. <<



[9] IFR Departamento de Estadística (Federación Internacional de Robótica, Frankfurt, 2007). <<



[10] Fred Hapgood, «Reverse Engineering the Brain», *Technology Review*, 11 de julio de 2006, www.technologyreview.com/read_article.aspx?id= 17111. <<

[11] John M. Harlow, M.D., «Passage of an Iron Rod Through the Head», *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, 11 de mayo de 1999, pp. 281283, www.neuro.psychiatryonline.org/cgi/content/full/11/2/281. <<



[12] Jonathan Fildes, «Artificial Brain ‘10 Years Away’», BBC News, 22 de julio de 2009, http://news.bbc.co.uk/2/hi/8164060.stm. <<



[13] Jason Palmer, «Simulated Brain Closer to Thought», BBC News, 22 de abril de 2009, http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/8012496.stm. <<

[14] Douglas Fox, «IBM Reveals the Biggest Artificial Brain of All Time», *Popular Mechanics*, 18 de diciembre de 2009, www.popularmechanics.com/technology/engineering/extrememachines/4337190. <<

[15] Sally Adee, «Reverse Engineering the Brain», *IEEE Spectrum*, junio de 2008, http://spectrum.ieee.org/biomedical/ethics/reverseengineeringthebrain/0. <<

[16] Vernor Vinge, «What Is the Singularity?», ponencia presentada en el VISION-21 Symposium, patrocinado por el Lewis Research Center de la NASA y el Ohio Aerospace Institute, 30-31 de marzo de 1993. Una versión ligeramente modificada apareció en *Whole Earth Review*, invierno de 1993, http://mindstalk.net/vinge/vingesing.html. <<

[17] Tom Abate, «Smarter Than Thou? Stanford Conference Ponders a Brave New World with Machines More Powerful Than Their Creators», *San Francisco Chronicle*, 12 de mayo de 2006, http://articles.sfgate.com/2006-05-12/business/17293318_1_ raykurzweilmachinesartificialintelligence. <<

[18] Kurzweil, p. 376. <<

[19] http://consc.net/mindpapers.com. <<

[20] Sheffield, p. 38. <<

[21] Kurzweil, p. 10. <<

[22] Abate, *San Francisco Chronicle*, 12 de mayo de 2006. <<

[23] Brian O'Keefe, «The Smartest (or the Nuttiest) Futurist on Earth» *Fortune*, 2 de mayo de 2007, http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune_archive/2007/05/14/100008848/. <<

[24] Greg Ross, «An Interview with Douglas R. Hofstadter», *American Scientist*, enero de 2007, www.americanscientist.org/bookshelf/pub/douglas-r-hofstadter. <<

[25] P. W. Singer, «Gaming the Robot Revolution», *Slate*, 21 de mayo de 2009, www.slate.com/id/2218834/. <<

[26] Rodney A. Brooks, «Making Living Systems», en John Brockman, ed., *Science at the Edge: Conversations with the Leading Scientific Thinkers of Today*, Sterling, Nueva York, 2008, p. 250. <<

[27] Rodney A. Brooks, «Flesh and Machines», en Denning, p. 63. <<

[28] Pam Belluck, «Burst of Technology Helps Blind to See», *New York Times*, 27 de septiembre de 2009, p. A1, www.nytimes.com/2009/09/27/health/research/27eye.html?_r=1&scp=1&sq="burst of technology" &st=cse. <<

[29] BBC-TV, 18 de octubre de 2009. <<

[30] Rodney A. Brooks, «The Merger of Flesh and Machines», en John Brockman, ed., *The Next Fifty Years*, Vintage, Nueva York, 2002, p. 189. <<

[31] *Ibid*., pp. 191-192. <<

[32] Stock, p. 23. <<

3. El futuro de la medicina: Más allá de la perfección



[1] David Baltimore, «How Biology Became an Information Science», en Denning, p. 43. <<

[2] Nicholas Wade, «Cost of Decoding a Genome Is Lowered», *New York Times*, 10 de agosto de 2009, p. D3, www.nytimes.com/2009/08/11/science/11gene.html. <<

[3] Jeanne Lenzer, «Have We Entered the Stem Cell Era?», *Discover*, noviembre de 2009, p. 33, http://discovermagazine.com/2009/nov/have-we-entered-the-stem-cell-era/article_view?b_start:int=1&C=. <<

[4] *Ibidem*. <<

[5] Stock, p. 5. <<

[6] *Ibid*., p. 36. <<

[7] Kate Kelland, «Gene Maps to Transform Scientists’ Work on Cancer», Reuters, 18 de diciembre de 2009. <<



[8] David Baltimore, «How Biology Became an Information Science», en Denning, p. 54. <<

[9] Kurzweil, p. 195. <<

[10] Stock, p. 108. <<

[11] Jonah Lehrer, «Small, Furry… and Smart?», *Nature* 461 (octubre de 2009), p. 864. <<

[12] *Ibidem*. <<



[13] Jonah Lehrer, «Smart Mice», *The Frontal Cortex*, 15 de octubre de 2009, http://scienceblogs.com/cortex/2009/10/smart_mice.php. <<

[14] Sheffield *et al*., p. 107. <<

[15] Kurzweil, p. 320. <<

[16] Kaku, p. 211. <<

[17] Nicholas Wade, «Tests Begin on Drugs That May Slow Aging», *New York Times,* 17 de agosto de 2009, p. D4, www.nytimes.com/2009/ 08/18/science/18aging.html?ref=caloric_restriction. <<

[18] Nicholas Wade, «Quest for a Long Life Gains Scientific Respect», *New York Times*, 29 de septiembre de 2009, p. D4, www.nytimes.com/2009/09/29/science/29aging.html?ref=caloric_restriction. <<

[19] Nicholas Wade, «Scientists Find Clues to Aging in a Red Wine Ingredient's Role in Activating a Protein», *New York Times*, 26 de noviembre de 2008, p. A30, www.nytimes.com/2008/11/27/health/27aging.html?scp=6&sq=sinclair%20resveratrol&st=cse. <<

[20] Wade, «Quest for a Long Life», *New York Times*, 28 de septiembre de 2009, p. D4, www.nytimes.com/2009/09/29/science/29aging.html?ref=caloric_restriction. <<

[21] Kurzweil, p. 253. <<

[22] Stock, p. 88. <<

[23] Ciara Curtin, «Fact or Fiction?: Living People Outnumber the Dead», *Scientific American*, marzo de 2007. <<

[24] Brown, p. 5. <<

[25] Richard Dawkins, *A Devil's Chaplain: Reflections on Hope, Lies, Science, and Love*, Houghton Mifflin Mariner, Nueva York, 2004, p. 113. <<



[26] Katherine S. Pollard, «What Makes Us Human?», *Scientific American*, mayo de 2009, p. 44. <<

[27] Nicholas Wade, «Scientists in Germany Draft Neanderthal Genome», *New York Times*, 12 de febrero de 2009, p. A12, www.nytimes.com/2009/02/13/science/13neanderthal.html?scp=3&sq=neanderthal&st=cse. <<

[28] *Ibidem*. <<

[29] Dawkins, p. 114. <<

[30] Kate Wong, «Scientists Sequence Half the Woolly Mammoth’s Genome», *Scientific American*, enero de 2009, p. 26, www.scientificamerican.com/article.cfm?id=woolly-mammoth-genome-sequenced. <<

[31] Stock, p. 183. <<

4. Nanotecnología: ¿Todo a partir de nada?

[1] Carl T. Hall, «Brave New NanoWorld Lies Ahead», *San Francisco Chronicle*, 19 de julio de 1999, http://articles.sfgate.com/19990719/news/17694442_1_ atom-molecules-nanotech. <<

[2] *Ibidem*. <<

[3] Citado en Kurzweil, p. 226. **<<**

[4] James R. Heath, Mark E. Davis y Leroy Hood, «Nanomedicine—Revolutionizing the Fight Against Cancer», *Scientific American*, febrero de 2009, p. 44. <<

[5] Emily Singer, «Stealthy Nanoparticles Attack Cancer Cells», *Technology Review*, 4 de noviembre de 2009, www.technologyreview.com/business/23855/. <<

[6] «Special Gold Nanoparticles Show Promise for “Cooking” Cancer Cells», www.eurekalert.org/pub_releases/200903/acssgn030909.php. <<

[7] Thomas E. Mallouk y Ayusman Sen, «How to Build Nanotech Motors», *Scientific American*, mayo de 2009, p. 72. <<

[8] Katherine Harmon, «Could a Microchip Help to Diagnose Cancer in Minutes», *Scientific American* blog post, 28 de septiembre de 2009, http://www.scientificamerican.com/blog/post.cfm?id=could-a-microchip-helpto-diagnose-2009-09-28. <<

[9] *Electronic News*, 18 de septiembre de 2007, www.edn.com/article/CA647968. <<

[10] *Electronic News*, 13 de julio de 2004. Véanse también Kurzweil, p. 112, y www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=04803. <<

[11] Alexis Madrigal, «Scientist Builds World’s Smallest Transistor, Gordon Moore Sighs with Relief», *Wired*, www.wired.com/wiredscience/2008/04 //scientists-buil/. <<

[12] *Ibidem*. <<

[13] Vint Cerf, «One Is Glad to Be of Service», en Denning, p. 229. <<

[14] Sharon Gaudin, «Intel Sees Future with Shape-shifting Robots, Wireless Power», *Computerworld*, 22 de agosto de 2008, www.computerworld.com/s/article/9113301/Intel_sees_future_with_shape_shifting_ro taxonomyId=12&pageNumber=2. <<

[15] *Ibidem*. <<

[16] *Ibidem*. <<

[17] Rudy Baum, «Nanotechnology: Drexler and Smalley Make the Case for and Against “Molecular Assemblers”», *Chemical & Engineering News* 81, 1 de diciembre de 2003, pp. 3742, http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html. <<

[18] BBC/Discovery Channel, *Visions of the Future*, parte II, 2007. <<

[19] Rodney A. Brooks, «Flesh and Machines», en Denning, p. 63. <<

5. El futuro de la energía: La energía de las estrellas

[1] kurzweil, p. 242. <<

[2] www.mkinghubbert.com/speech/prediction. <<

[3] Sheffield, p. 179. <<

[4] www.gwec.net/index.php?id=125. <<

[5] Tad Friend, «Plugged In», *The New Yorker*, 24 de agosto de 2009, pp. 5059. <<

[6] «GM Convinced the Future Is in Fuel Cells», CBS News, 11 de septiembre de 2009, www.cbsnews.com/stories/2009/09/11/tech/main 5302610.shtml?tag=mncol;lst;6. <<

[7] Business Wire, www.businesswire.com/portal/ge/index. Véase también www.swampfox.ws/node/26502. <<

[8] Brown, p. 63. <<

[9] Brown, p. 64. <<

[10] Brown, p. 65. <<

[11] Brown, pp. 56-57. <<

[12] Peter Schwartz y Doug Randall, «An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security», Global Business Network, octubre de 2003, p. 18. PDF disponible en www.gbn.com/search.php?topnavSearch=envision+pakistan%2C+india&x=0&y=0. <<

[13] Cornelia Dean, «Experts Ponder the Hazards of Using Technology to Save the Planet», *New York Times*, 12 de agosto de 2008, p. F4, www.nytimes.com/2008/08/12/health/12ihtethics.3.15212327.html?_r=1&scp=10&sq=planktos&st=cse. <<

[14] Matthew L. Wald, «Refitted to Bury Emissions, Plant Draws Attention», *New York Times*, 29 de septiembre de 2009, p. A19, www.nytimes.com/2009/09/22/science/earth/22coal.html?ref=american_electric_power_company. <<

[15] J. Craig Venter, citado en *Oil and the Future of Energy: Climate Repair, Hydrogen, Nuclear Fuel, Renewable and Green Sources, Energy Efficiency*, editores de Scientific American, Lyons Press, Guilford, Conn., 2007, pp. 220-221. De la presentación de Venter «Synthetic Genomics» en la Conferencia sobre Biología Sintética (SB2.0), Berkeley, California, 20 de mayo de 2006. Audio disponible en http://webcast.berkeley.edu/event_15766. <<

[16] Freeman J. Dyson «Can We Control the Carbon Dioxide in the Atmosphere?», *Energy* 2 (1977), pp. 287-291. <<

[17] Sheffield, p. 158. <<

[18] Ralph Lapp, citado en «Perón’s Atom», *Time*, 2 de abril de 1951, www.time.com/magazine/article/0,9171,814503,00.html. <<

[19] Seife, p.76. <<

[20] W. Wayt Gibbs, «Plan B for Energy: 8 Revolutionary Energy Sources», *Scientific American*, septiembre de 2006; reeditado el 2 de abril de 2009, www.scientificamerican.com/article.cfm?id= plan-b-for-energy-8-ideas. <<

[21] *Ibidem*. <<

[22] Seife, p. 211. <<

[23] ITER, www.iter.org/factsfigures. <<

[24] Gibbs, «Plan B», *Scientific American*, septiembre de 2006. <<

[25] Editores de *Scientific American, Oil and the Future of Energy*, p. 217. <<

[26] Ben Bova, «To the Next President» (título original: «An Energy Fix Written in the Stars», editorial, *Washington Post*, 12 de octubre de 2008), www.nss.org/settlement/ssp/bova.htm. <<

[27] *International Herald Tribune*, 2 de septiembre de 2009, p. 14. Véase también Shigeru Sato y Yuji Okada, «Mitsubishi, IHI to Join $21 Bln Space Solar Project», Bloomberg, 31 de agosto de 2009, www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=aJ529lsdk9HI. <<

[28] Shigeru Sato y Yuji Okada, «Mitsubishi, IHI to Join $21 Bln Space Solar Project», Bloomberg, 31 de agosto de 2009, www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=aJ529lsdk9HI. <<

6. El futuro de los viajes espaciales: Hacia las estrellas

[1] http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/1999/ast02feb99_1/. <<

[2] http://lcross.arc.nasa.gov. <<

[3] *New York Times*, 16 de septiembre de 2010, p. A3. <<

[4] Dyson, pp. 8899. <<

[5] Katherine Bourzac, «Making Carbon Nanotubes into Long Fibers», *Technology Review*, 10 de noviembre de 2009, www.technologyreview.com/energy/23921/. <<

[6] BBC-TV, 5 de noviembre de 2009. <<

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Ikaros. <<

[8] Nicholas Dawidoff, «The Civil Heretic», *New York Times*, 25 de marzo de 2009, www.nytimes.com/2009/03/29/magazine/29Dyson-t.html?pagewanted=7&_r=1. <<

[9] Vint Cerf, «One Is Glad to Be of Service», en Denning, pp. 229-230. <<

[10] Scott A. Dickson, «Enabling Battlespace Persistent Surveillance: The Form, Function and Future of Smart Dust», abril de 2007 (Blue Horizon Paper, Center for Strategy and Technology, Air War College). <<

7. El futuro de la riqueza: Ganadores y perdedores

[1] Umi Hani Sharani, «Muslims Almost Totally Dependent on Others, Says Mahathir», Muslim Institute, 15 de abril de 2006, www.musliminstitute.com/article.php?id=499. <<

[2] William J. Holstein, «To Gauge the Internet, Listen to the Steam Engine», *New York Times*, 26 de agosto de 2001, http://www.nytimes.com/2001/08/26/business/26SVAL.html?scp=1&sq=%22to%20gauge%20the%20internet%22&st=cse. <<

[3] Virginia Postrel, «Avoiding Previous Blunders», *New York Times*, 1 de enero de 2004, www.nytimes.com/2004/01/01/business/01scene.html. <<

[4] *Ibidem*. <<



[5] Thomas L. Friedman, «Green the Bailout», *New York Times*, 28 de septiembre de 2008, p. WK11, www.nytimes.com/2008/09/28/opinion/28friedman.html. <<

[6] Steve Lohr, «New Economy; Despite Its Epochal Name, the Clicks-and-Mortar Age May Be Quietly Assimilated», *New York Times*, 8 de octubre de 2001, www.nytimes.com/2001/10/08/business/new-economy-despite-its-epochal-name-clicks-mortar-age-may-be-quietly.html?scp=30&sq=automobile&st=nyt. <<

[7] *Ibidem*. <<

[8] Charles Gasparino, «Merrill Lynch to Offer Online Trading», ZDNet News, 1 de junio de 1999, www.zdnet.com/news/merrill-lynch-tooffer-online-trading/95883. <<

[9] *Ibidem*. <<

[10] McRae, p. 175. <<

[11] Thurow, p. 68. <<

[12] Thurow, p. 74. <<

[13] McRae, p. 12. <<

[14] Thurow, p. 67. <<

[15] James Grant, «Sometimes the Economy Needs a Setback», *New York Times*, 9 de septiembre de 2001, www.nytimes.com/2001/09/09/opinion/sometimes-the-economy-needs-a-setback.html. <<

[16] Thurow, p. 72. <<

[17] McRae, pp. 1213. <<

[18] Toffler, p. 288. <<

8. El futuro de la humanidad: Una civilización planetaria

[1] Kenichi Ohmae, *The End of the Nation State: The Rise of Regional Economies,* Free Press, Nueva York, 1995, p. 45. <<

[2] Benjamin Franklin, carta a Joseph Priestley, citada en Cornish, p. 173. **<<**

[3] http://www.brainyquote.com/quotes/authors/i/immanuel_kant_2.html. <<

[4] http://www.brainyquote.com/quotes/topics/topic_science4.html. <<

[5] http://www.brainyquote.com/quotes/keywords/democracy.html. <<

[6] http://www.brainyquote.com/quotes/authors/g/george_bernard_shaw_2.htm. <<

[7] Citado en Rhodes, p. 61. <<

9. Un día cualquiera en 2100

[1] http://thinkexist.com/quotation/the_roots_of_violencewealth_without_work/191301.html. <<



[*] Empuje por curvatura (del espacio-tiempo), también llamado impulso de deformación o de distorsión. Método de desplazamiento empleado en el universo ficticio de *Star Trek.* (*N. de la T.*) <<



[*] Expresión militar acuñada por Carl von Clausewitz en su libro *De la guerra*, que alude a la imprecisión en el conocimiento de la situación de los elementos que participan en una operación bélica. (*N. de la T.*) **<<**

[*] Instalación de realidad virtual simulada mediante hologramas. (*N. de la T.*) **<<**



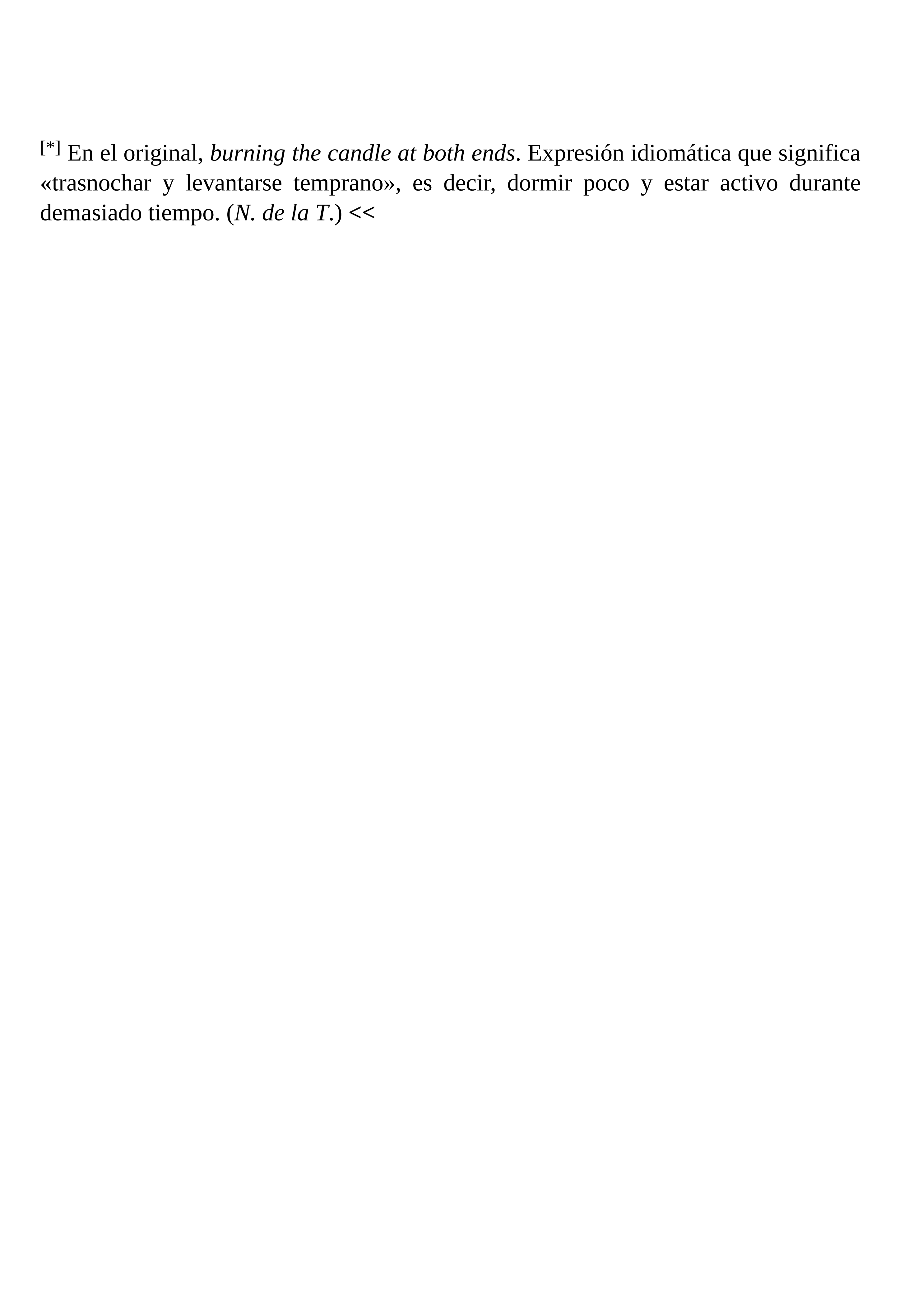
[*] Tricodificador o registrador de triple función: detectar, registrar, analizar. *(N. de la T.)* <<

[*] Personas muy inteligentes y con gran dedicación al estudio pero retraídas socialmente. El estereotipo lo estableció el filósofo Timothy Charles Paul hacia 1970, y la película *La revancha de los novatos / La venganza de los nerds* (1984) contribuyó considerablemente a su popularidad. (*N. de la T.*) <<

[*] Androide que ejercía la medicina en la comedia estadounidense que lleva el mismo título estrenada en 2008. (*N. de la T.*) **<<**

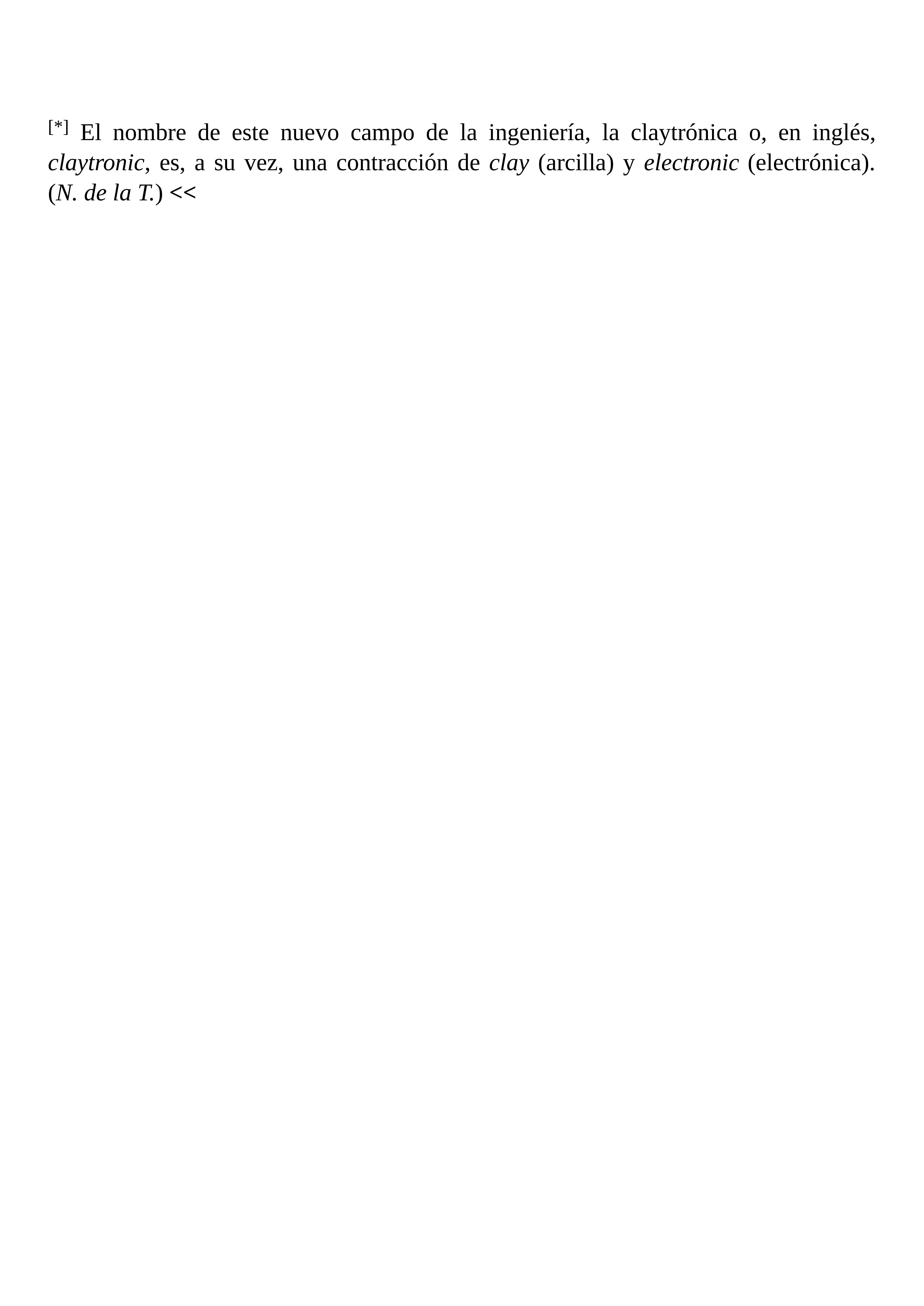


[*] «*Aceite de serpiente*» (snake oil) era el nombre de un elixir mágico que vendían los charlatanes para curar toda clase de dolencias. Esta expresión se utiliza para designar cualquier remedio que se venda para engañar a los incautos. (*N. de la T.*) **<<**



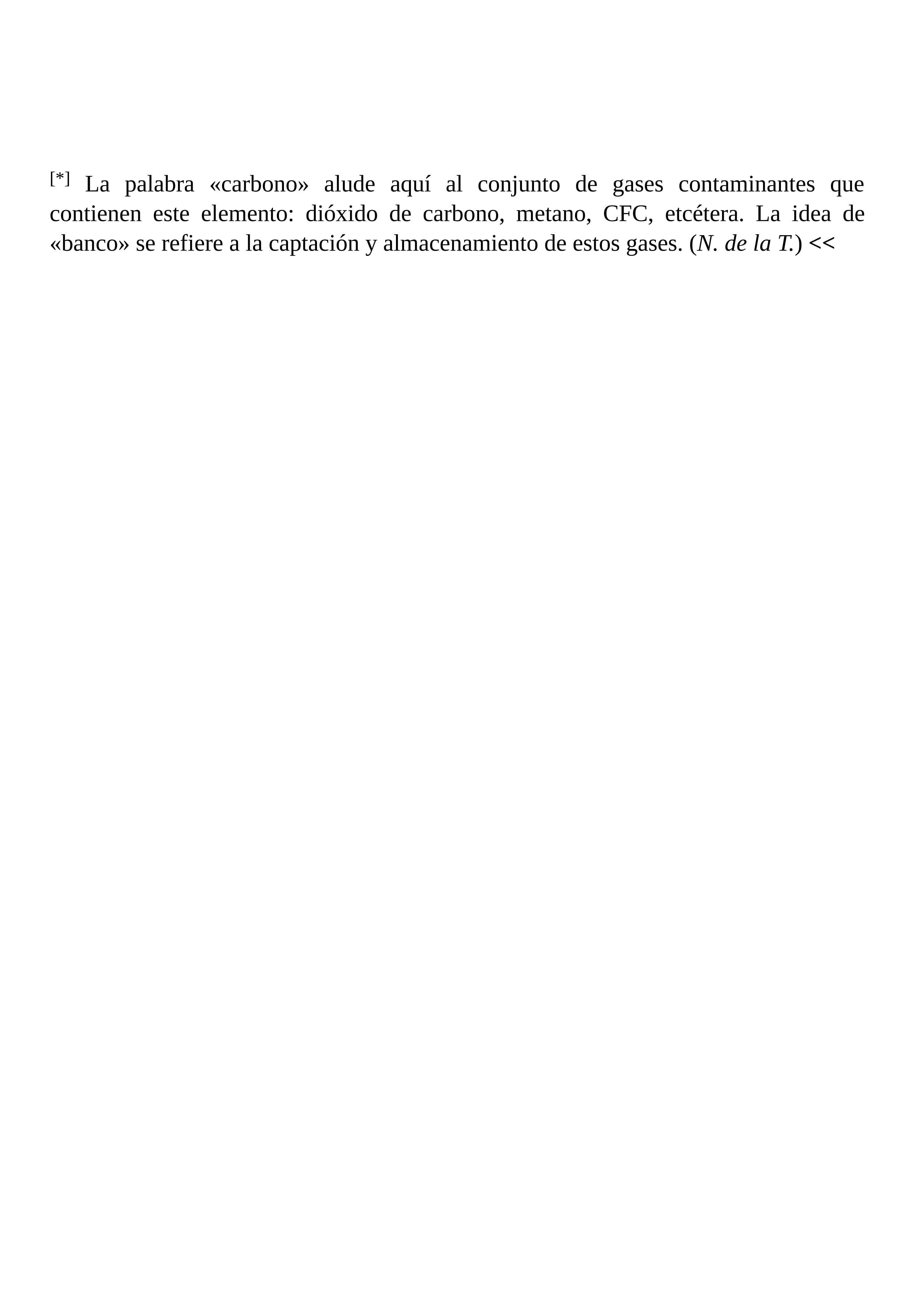
[*] En el original, *burning the candle at both ends*. Expresión idiomática que significa «trasnochar y levantarse temprano», es decir, dormir poco y estar activo durante demasiado tiempo. (*N. de la T.*) **<<**

[*] O balones de Bucky. Se trata del buckminsterfullereno o fullereno C60: una nanoestructura compuesta por 60 átomos de carbono organizados en un volumen cerrado y simétrico con caras pentagonales que recuerda a un balón de fútbol, o a un domo geodésico. Se llama así en honor al ingeniero y arquitecto Buckminster Fuller, autor de trabajos en los que exploraba las posibilidades de los domos geodésicos. (*N. de la T.*) <<



[*] El nombre de este nuevo campo de la ingeniería, la claytrónica o, en inglés, *claytronic*, es, a su vez, una contracción de *clay* (arcilla) y *electronic* (electrónica). (*N. de la T.*) <<

[*] En inglés, *gray goo*, sustancia informe y viscosa de color gris. (*N. de la T.*) **<<**



[*] La palabra «carbono» alude aquí al conjunto de gases contaminantes que contienen este elemento: dióxido de carbono, metano, CFC, etcétera. La idea de «banco» se refiere a la captación y almacenamiento de estos gases. (*N. de la T.*) **<<**

[*] Del inglés *magnetic levitation*. (*N. de la T.*) **<<**


MICHIO
KAKU
LA FÍSICA
DEL FUTURO
CÓMO LA CIENCIA
DETERMINARÁ EL DESTINO
DE LA HUMANIDAD Y
NUESTRA VIDA COTIDIANA
EN EL SIGLO XXII
Lectulandia